



SKRIPSI - ME 141501

**ANALISA DAMPING TERHADAP SISTEM KERJA
BANDULAN PENDULUM VERTIKAL SEBAGAI ENERGI
ALTERNATIF UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA
GELOMBANG LAUT - SISTEM BANDULAN (PLTGL - SB)**

Pandika Darmawan
NRP 4212 105 007

Dosen Pembimbing I
Irfan Syarif Arief, ST., MT.

Dosen Pembimbing II
Ir. Agoes Santoso, M.Sc., M.Phil., C.Eng.

JURUSAN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

"Halaman ini sengaja dikosongkan"



FINAL PROJECT - ME 141501

**DAMPING ANALYSIS FOR PERFORMANCE SYSTEM OF
VERTICAL PENDULUM AS ALTERNATIVE ENERGY
SOURCE ON OCEAN WAVE ENERGY CONVERTER
PENDULUM POWERED SYSTEM (PLTGL - SB)**

Pandika Darmawan
NRP 4212 105 007

Supervisor I
Irfan Syarif Arief, ST., MT.

Supervisor II
Ir. Agoes Santoso, M.Sc., M.Phil., C.Eng.

JURUSAN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2016

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur kehadiran Allah SWT, yang selalu memberikan rahmat serta hidayah-Nya. Sehingga skripsi dengan judul “ANALISA DAMPING TERHADAP SISTEM KERJA BANDULAN PENDULUM VERTIKAL SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT – SISTEM BANDULAN (PLTGL – SB)”, ini dapat diselesaikan tepat pada waktunya..

Tugas akhir ini merupakan sebuah studi lanjutan dari eksperimental sebelumnya, pengujian sebenarnya telah dilakukan melalui uji lapangan untuk menganalisa pengaruh damping di tiap - tiap sudut pada pendulum vertikal untuk mengetahui jumlah simpangan dengan waktu yang dihasilkan tiap ayunan pada pendulum vertikal tersebut.

Tentunya untuk menyelesaikan tugas akhir ini tidak lepas dari dukungan berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orangtua dan keluarga yang selalu memberikan doa dan dukungan, sehingga penulis dapat menempuh sarjana tepat waktu.
2. Bapak Dr. Eng. M. Badrus Zaman, ST., MT. selaku ketua jurusan Teknik Sistem Perkapalan, FTK – ITS yang telah memberikan bimbingan dan arahan sehingga penulis dapat menyelesaikan seluruh kegiatan perkuliahan.
3. Bapak Ir. Agoes Santoso, M.Sc., M.Phil. selaku dosen wali dan dosen pembimbing tugas akhir penulis yang telah memberikan ide, ilmu, arahan, serta bimbingan selama proses perkuliahan dan dalam pengerjaan skripsi ini.
4. Bapak Irfan Syarif Arief, ST., MT. selaku dosen pembimbing tugas akhir penulis yang telah memberikan ide, ilmu, arahan, serta bimbingan selama proses perkuliahan dan dalam pengerjaan skripsi ini.

5. Laboratorium Marine Manufacture & Design, yang telah memberikan bantuan dalam proses pengerjaan.
6. Teman angkatan LJ Ganjil 2012 terima kasih buat rasa kekeluargaan yang telah diberikan.
7. Serta berbagai pihak yang telah membantu baik dari segi moril dan materil dalam pengerjaan Tugas Akhir.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, segala saran serta masukan yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan dan kemajuan dalam skripsi ini.

Semoga Allah SWT melimpahkan berkah dan rahmat-Nya kepada kita semua dan semoga laporan skripsi ini dapat bermanfaat dikemudian hari. Amin.

Surabaya, 26 Januari 2015

Penulis

LEMBAR PENGESAHAN**ANALISA DAMPING TERHADAP SISTEM KERJA
BANDULAN PENDULUM VERTIKAL SEBAGAI
ENERGI ALTERNATIF UNTUK PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT – SISTEM
BANDULAN (PLTGL – SB)****TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Bidang Studi Marine Manufacturing and Design (MMD)
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

PANDIKA DARMAWAN
NRP. 4212 105 007

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Skripsi :

Irfan Syarif Arief, ST., MT.
(1969 1225 1997 02 1001)

Ir. Agoes Santoso, M.Sc., M.Phil., C.Eng.
(1968 0928 1991 02 1001)



SURABAYA,
JANUARI 2016

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

LEMBAR PENGESAHAN

**ANALISA DAMPING TERHADAP SISTEM KERJA
BANDULAN PENDULUM VERTIKAL SEBAGAI
ENERGI ALTERNATIF UNTUK PEMBANGKIT
LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT – SISTEM
BANDULAN (PLTGL – SB)**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Bidang Studi Marine Manufacturing and Design (MMD)
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

PANDIKA DARMAWAN
NRP. 4212 105 007

Disetujui oleh Ketua Jurusan .



Dr. Eng. M. Badrus Zaman, ST., MT.
NIP. 1977 0802 2008 01 1007

SURABAYA,

JANUARI 2016

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

**ANALISA DAMPING TERHADAP SISTEM KERJA BANDULAN
PENDULUM VERTIKAL SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF
UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT
- SISTEM BANDULAN (PLTGL - SB)**

Nama Mahasiswa : PANDIKA DARMAWAN
NRP : 4212 105 007
Jurusan : Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS
Dosen Pembimbing : 1. Irfan Syarif Arief. ST, MT.
: 2. Ir. Agoes Santoso, M.Sc., M.Phil.

Abstrak

Seperti yang kita ketahui telah terjadi krisis energy, sehingga memaksa setiap individu untuk dapat kompetitif dalam pengembangan energy alternatif. Sehingga muncullah ide untuk mengembangkan pembangkit listrik tenaga gelombang laut - sistem bandulan. Pembangkit yang di pergunakan adalah ponton dengan bentuk segi delapan dan menggunakan bandul dengan bentuk pendulum vertikal . Diharapkan nantinya ponton dengan penggerak bandul ini adalah salah satu alat yang digunakan untuk mengkonversi dari energy laut menjadi energy listrik. Dimana pendulum bandul bisa bergerak dengan variasi sudut karena adanya pergerakan ponton yang disebabkan oleh gelombang laut. Dalam kajian percobaan simulasi pergerakan pendulum vertikal ini, terdapat banyak variasi sudut pada pendulum yang akan berpengaruh pada kinerja dari gerakan pendulum terhadap transmisi yang menuju generator. Simpangan pendulum yang paling bagus yaitu pada sudut 70° dengan jumlah simpangan sebanyak 71 kali pada beban bandul sebesar 300 kg dengan lama waktu gerak pendulum sampai titik nol yaitu 200 detik. dengan hasil yang didapat Diharapkan nantinya skripsi ini dapat menjadi acuan untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga gelombang di Indonesia.

Kata Kunci : Pendulum Vertikal, Simulasi, Simpangan

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

**DAMPING ANALYSIS FOR PERFORMANCE SYSTEM
OF VERTICAL PENDULUM AS ALTERNATIVE
ENERGY SOURCE ON OCEAN WAVE ENERGY
CONVERTER PENDULUM POWERED SYSTEM
(PLTGL – SB)**

Name of Student : PANDIKA DARMAWAN
NRP : 4212 105 007
Major : Teknik Sistem Perkapalan FTK-ITS
Supervisor : 1. Irfan Syarif Arief. ST, MT.
: 2. Ir. Agoes Santoso, M.Sc., M.Phil.

Abstract

As we know energy crisis has happened, it forces each individual to be competitive in the development of alternative energy. So come up the idea to develop a sea wave power plant - pendulum system. A plant which is used is a pontoon with octagonal shape and using a pendulum to form a vertical pendulum. Expected this pontoon with drive pendulum will be used as a tool to convert the ocean energy into electrical energy, where the pendulum can move with the variation of the angle due to the movement of pontoons caused by ocean waves.

In the simulation, there are many variations the vertical movement of pendulum angle that will affect the performance of the pendulum movement at the transmission to the generator. The greatest pendulum deviation that is at an angle of 70° with the amount of deviation of as much as 71 times at a load of 300 kg pendulum with a pendulum motion a long time until the zero point of 200 seconds with the results obtained. The writer hopes that this paper can be a reference for the development of wave power plant in Indonesia.

Keywords: *Vertical Pendulum, Simulation, Deviation*

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

DAFTAR ISI

Halaman Judul_id	i
Halaman Judul_en.....	iii
Lembar Pengesahan Pembimbing	v
Lembar Pengesahan Ketua Jurusan.....	vii
Kata Pengantar	ix
Abstrak Indonesia	xi
Abstrak English.....	xiii
Daftar Isi	xv
Daftar Gambar	xvii
Daftar Tabel	xix

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	4
1.4 Tujuan Skripsi	4
1.5 Manfaat	5

BAB II TINJAUAN PSTAKA

2.1 Energi Laut	7
2.2 Energi Gelombang laut	8
2.3 Stabilitas.....	11
2.4 Stabilitas Benda di Perairan	12
2.4.1 Titik Stabilitas Benda di Perairan	12
2.4.2 Ukuran Dalam Stabilitas.....	14
2.4.3 Segitiga Stabilitas	15
2.4.4 Kondisi Stabilitas.....	17
2.5 Tjauan Riset Sebelumnya	18
2.6 Teori Bandul Sederhana.....	20
2.7 PLTGL-SB.....	23
2.8 Lokasi PLTGL-SB.....	23

2.9 Teori Sistem Getaran	24
2.9.1 Derajat Kebebasan	25
2.9.2 Gerakan Harmonis	26
2.9.3 Persamaan Diferensial Sistem Gerakan.....	27
2.9.4 Penjelasan Redaman.....	29
2.10 Fungsi-fungsi Solidwork	31
2.10.1 Tampilan Solidwork.....	32
2.10.2 Fasilitas Solidwork Yang Dipakai.....	33
2.10.3 Faktor Keamanan	33

BAB III METODOLOGI

3.1 Identifikasi dan Perumusan Masalah	36
3.2 Pemahaman Dasar Teori	36
3.3 Pengumpulan Data	36
3.4 Penggambaran Model	37
3.5 Motion Analysis.....	37
3.6 Analisa Data dan Pembahasan	37
3.7 Pengambilan Kesimpulan	37

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Umum	39
4.2 Geometri Konstruksi dan Pendulum	39
4.3 Perhitungan Bandul.....	44
4.3.1 Perhitungan Tinggi Simpangan Bandul	44
4.3.2 Perhitungan Torsi Sistem	45
4.3.3 Perhitungan Momen Inersia	46
4.3.4 Perhitungan Putaran Sudut Natural	46
4.3.5 Perhitungan Putaran Sudut.....	47
4.3.6 Perhitungan RPM.....	47
4.3.8 Perhitungan Energi Kinetik.....	47
4.3.9 Daya Yang Dihasilkan Bandul.....	48
4.4 Pembahasan Simulasi Pendulum Vertikal.....	49
4.4.1 Perbandingan Analisa Damping Pendulum Vertikal Dengan sudut 10^0	49

4.4.2 Perbandingan Analisa Damping Pendulum Vertikal Dengan sudut 20^0	51
4.4.3 Perbandingan Analisa Damping Pendulum Vertikal Dengan sudut 30^0	53
4.4.4 Perbandingan Analisa Damping Pendulum Vertikal Dengan sudut 40^0	55
4.4.5 Perbandingan Analisa Damping Pendulum Vertikal Dengan sudut 50^0	57
4.4.6 Perbandingan Analisa Damping Pendulum Vertikal Dengan sudut 60^0	59
4.4.7 Perbandingan Analisa Damping Pendulum Vertikal Dengan sudut 70^0	61
4.5 Ringkasan Hasil Simulasi Pendulum Vertikal Pada Variasi Pembebanan dan Tiap-tiap Variasi Sudut	63

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	65
5.2 Saran	66

DAFTAR PUSTAKA

67

BIODATA PENULIS

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 : Jumlah Model Sistem Yang dikembangkan oleh Beberapa Negara	8
Gambar 2.2 : Flowchart Penangkapan Energi Gelombang Laut...	9
Gambar 2.3 : Model SEAREV berupa pendulum vertikal.....	10
Gambar 2.4 : PLTGL Sistem pendulum yang diletakkan vertikal diatas ponton dan lampu sebagai beban.....	10
Gambar 2.5 : Stabilitas Melintang	11
Gambar 2.6 : Titik Stabilitas pada Benda di Perairan	12
Gambar 2.7 : Letak Titik Berat Benda di Perairan	13
Gambar 2.8 : Letak Titik Apung Benda	13
Gambar 2.9 : Letak Titik Metasentris	14
Gambar 2.10 : Ukuran – Ukuran yang Digunakan Dalam Perhitungan Stabilitas	14
Gambar 2.11 : Segitiga Gaya Apung, Gravitasi dan Lengan Penegak	16
Gambar 2.12 : Lengan Penegak Pada Saat Kapal Senget	12
Gambar 2.13 : Posisi Stabilitas Positif	17
Gambar 2.14 : Posisi Stabilitas Netral	18
Gambar 2.15 : Posisi Stabiitas Negatif	18
Gambar 2.16 : Pendulum Sederhana	20
Gambar 2.17 : free body diagram dari massa pendulum sederhana	21
Gambar 2.18 : Hubungan Nilai Rata Periode dengan akar panjang lengan	22
Gambar 2.19 : Peta Tanjung Bumi, Bangkalan, Madura	24
Gambar 2.20 : Pendulum	24
Gambar 2.21 : Sistem dengan satu derajat kebebasan	25
Gambar 2.22 : Sistem dengan multi derajat kebebasan.....	26
Gambar 2.23 : Scoth yoke mechanism.....	27
Gambar 2.24 : Free Body Diagram Model Sistem.....	28

Gambar 2.25 : Kondisi underdamped, critically damped & overdamped system.....	29
Gambar 2.26 : Hasil eksperimen dari respon sistem teredam.....	30
Gambar 3.1 : Flow Chart Metodologi Penelitian.....	35
Gambar 4.1 : Model 3D PLTGL-SB.....	39
Gambar 4.2 : Drawing 2D PLTGL – SB <i>Detail View</i>	40
Gambar 4.3 : Sketsa pendulum.....	41
Gambar 4.4 : <i>Freebody</i> diagram bandul.....	44
Gambar 4.5 : Grafik Damping dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 10^0	50
Gambar 4.6 : Grafik Damping dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 10^0	50
Gambar 4.7 : Grafik Damping dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 10^0	51
Gambar 4.8 : Grafik Damping dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 20^0	52
Gambar 4.9: Grafik Damping dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 20^0	52
Gambar 4.10: Grafik Damping dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 20^0	53
Gambar 4.11: Grafik Damping dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 30^0	54
Gambar 4.12 : Grafik Damping dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 30^0	54
Gambar 4.13 : Grafik Damping dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 30^0	55
Gambar 4.14 : Grafik Damping dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 40^0	55
Gambar 4.15 : Grafik Damping dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 40^0	56

Gambar 4.16 : Grafik Damping dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 40^0	56
Gambar 4.17 : Grafik Damping dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 50^0	57
Gambar 4.18 : Grafik Damping dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 50^0	59
Gambar 4.19 : Grafik Damping dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 50^0	59
Gambar 4.20 : Grafik Damping dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 60^0	59
Gambar 4.21 : Grafik Damping dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 60^0	60
Gambar 4.22 : Grafik Damping dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 60^0	61
Gambar 4.23 : Grafik Damping dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 70^0	61
Gambar 4.24 : Grafik Damping dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 70^0	62
Gambar 4.25 : Grafik Damping dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 70^0	62

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	: Torsi Pada bandul akibat variasi sudut dan massa.....	8
Tabel 4.2	: Daya Pada Bandul akibat variasi sudut dan massa....	9
Tabelr 4.3	: Hasil Analisa motion analisis gerakan dari pendulum vertikal.....	10

"Halaman ini sengaja dikosongkan"

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Seiring meningkatnya kebutuhan akan penggunaan energi, mengakibatkan semakin berkurangnya bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama. Sumber energi seperti minyak bumi, gas alam dan batu bara diperkirakan akan habis sekitar 30 tahun mendatang. Selain itu, penggunaannya juga tidak ramah lingkungan karena emisi gas dan polusi lain yang ditimbulkan. Penggunaan energi nuklir membutuhkan biaya yang besar selain juga terbatas masalah keamanan. Pembangkit tenaga air yang lebih murah tidak bisa diaplikasikan di banyak tempat karena kaitannya dengan musim dan ketersediaan air. Oleh karena itu, kontribusi dari sumber energi terbarukan akan terus meningkat. Matahari, angin, laut, air, elektromagnetik, elektrostatik, panas, getaran, dan gerakan tubuh manusia merupakan macam – macam sumber energi terbarukan [1].

Indonesia adalah salah satu negara dengan dua per tiga wilayahnya adalah laut. Salah satu potensi laut yang belum banyak diketahui masyarakat umum adalah potensi energi laut untuk menghasilkan listrik. Potensi energi laut yang dapat menghasilkan listrik dapat dibagi kedalam tiga jenis potensi energi, yaitu energi pasang surut (*tidal power*), energi gelombang laut (*wave energy*), dan energi panas laut (*ocean thermal energy*) [2].

Dibandingkan dengan teknologi hijau lainnya seperti energi matahari dan angin, energi gelombang laut memberikan ketersediaan mencapai 90% dengan kawasan yang potensial tidak terbatas [3]. Energi gelombang laut adalah energi yang dihasilkan dari pergerakan gelombang laut menuju daratan dan sebaliknya.

Berikut ini dapat dilihat perbandingan ketersediaan energi gelombang laut, angin, dan matahari.

Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandulan (PLTGL-SB) adalah salah satu pembangkit listrik yang memanfaatkan gelombang laut sebagai sumber energinya. Ini berdasarkan penelitian Zamrisyaf, pegawai pusat penelitian dan pengembangan Perusahaan Listrik Negara (PLN) sejak tahun 2002. Temuan Zamrisyaf telah mendapatkan penyempurnaan lewat kerjasama dengan Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, diantaranya telah menghasilkan ukuran – ukuran ponton, berat bandul dan panjang lengan bandul serta daya dan putaran yang dihasilkan.

Cara kerja PLTGL-SB ini cukup menarik. Ponton yang berfungsi sebagai kapal mengangkut bandul yang terintegrasi dengan dinamo. Untuk menghasilkan putaran dinamo yang maksimal, bandul dibantu dengan alat transmisi *double-freewheel* dan diintegrasikan dengan bantuan rantai. Setiap gerakan air laut akan menggoyangkan bandul sehingga menggerakkan *double-freewheel* untuk memutar dinamo menghasilkan listrik [4].

Energi yang dihasilkan alat ini sangat tergantung dari gerakan ponton. Gerakan yang terjadi pada ponton adalah gerakan rotasi dan translasi, gerakan ini muncul sebagai akibat dari tabrakan dengan permukaan gelombang atau tekanan naik turun di bawah permukaan laut [5]. Dengan demikian, model ponton, variasi sudut kemiringan lambung ponton, jenis dan ukuran gelombang yang terjadi dimana ponton dipasang, dan cara pemasangan ponton itu sendiri merupakan beberapa hal yang berpengaruh terhadap gerakan yang dihasilkan ponton.

Misalnya pada suatu tempat yang sama dilakukan pemasangan dua buah ponton untuk energi gelombang, dimensi

yang diberikan sama akan tetapi berbeda dalam hal model. Kemungkinan dari kedua ponton itu akan menghasilkan gerakan yang berbeda, energi yang dihasilkan pasti akan berbeda pula. Ketika kedua ponton tadi dipindahkan ke suatu tempat dengan lingkungan yang berbeda dari sebelumnya, kemungkinan hasil yang didapat bisa saja berbeda dari tempat yang pertama. Dari sini terlihat bahwa perbedaan model ponton dapat berpengaruh terhadap gerakan yang dihasilkan, selain itu faktor lingkungan juga memiliki kemungkinan mempengaruhi kinerja. Sekarang masalahnya adalah bagaimana mendapatkan model ponton yang bisa menghasilkan gerakan yang sesuai untuk diaplikasikan pada PLTGL-SB pada suatu daerah tertentu.[6]

Penelitian kali ini penulis fokus pada pendulum bandul vertikal, yang akan mem-variasikan tiap sudut yang terjadi oleh gerakan ponton. Lalu di-analisa untuk simpangan yang terjadi pada pendulum, Kemudian pengaruh terhadap waktu dan berapa kali terjadi simpangan pendulum pada sudut-sudut tertentu.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang menjadi bahan analisa dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh variasi berat bandul terhadap sudut simpangan pendulum dengan kemiringan yang diakibatkan oleh tinggi gelombang terhadap gerakan dari ponton tripod.
2. Bagaimana pengaruh variasi waktu terhadap simpangan sudut pendulum yang diakibatkan oleh gerakan ponton.

3. Bagaimana perbandingan grafik rasio damping pada tiap-tiap variasi sudut pendulum dengan pemberian variasi beban bandul.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Pengaruh gerakan ponton terhadap gerakan vertikal pendulum bandul diabaikan.
2. Tidak memperhitungkan besarnya energi listrik yang dihasilkan dari jumlah simpangan pendulum.
3. Tidak menggunakan simulasi getaran pada saat running motion analisis Finite Element Methode .
4. Nilai yang didapatkan dalam simulasi hanya digunakan sebagai pembanding antara beberapa variasi yang diberikan.
5. Tidak menghitung analisa simulasi transmisi dari gerakan pendulum.

1.4 Tujuan

Tujuan dari analisa yang dilakukan dalam penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh sudut pendulum pada tiap-tiap berat bandul terhadap simpangan pendulum yang diterima oleh pengaruh gerak dari ponton tripod.
2. Mengetahui pengaruh variasi waktu terhadap simpangan sudut pendulum yang diakibatkan oleh gerak ponton tripod.
3. Mengetahui perbandingan grafik rasio damping pada tiap-tiap variasi sudut pendulum dengan pemberian variasi beban bandul terhadap gerakan pendulum yang sesuai

untuk diaplikasikan pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandulan (PLTGL-SB).

1.5 Manfaat

Manfaat yang didapat dari penelitian ini adalah untuk mendapatkan gerakan simpangan pendulum pada tiap-tiap sudut yang sesuai untuk diaplikasikan pada PLTGL-SB. Diharapkan nantinya akan meningkatkan efisiensi dari jumlah pemasangan pendulum vertikal pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandulan (PLTGL-SB).

“ Halaman ini sengaja dikosongkan ”

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Laut

Pengembangan Energi laut mulai diperhatikan oleh masyarakat dunia secara serius mulai tahun 1981, dimana energi laut belum dikelola dengan optimal. Hasil survey dari organisasi internasional yang (IEA/OES) membidangi sistem energi laut menggambarkan ada empat (4) macam bentuk pemanfaatan energi laut yaitu *Ocean Wave*, *Tides*, *Tidal Current*, *OTEC* dan *Salinity Gradient*. Dibawah ini tabel estimasi potensi energi laut yang ada dan perkiraan yang bisa di serap.

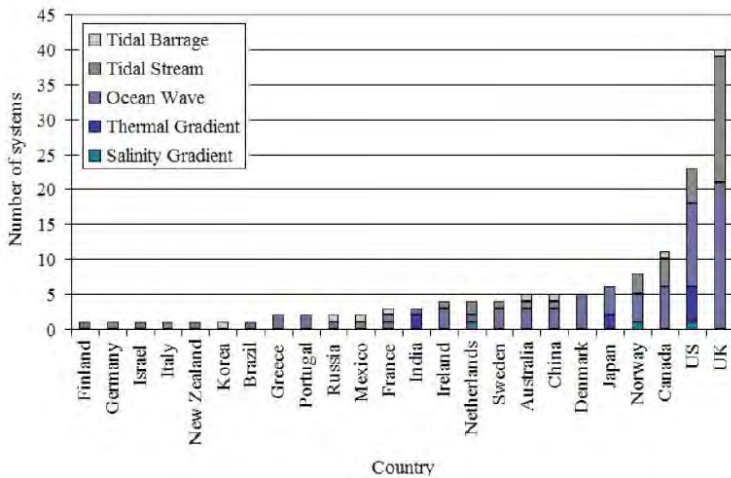
Tabel 2.1 Potensi energi laut yang ada di dunia hasil statistik IEA-OES tahun 2006

Sistem Energi Laut	Estimasi Ketersediaan Energi (Twh/year)*	Total Potensi Energi Laut yang bisa diserap (Twh/year)
Ocen Wave (Gelombang Laut)	80.000	17.400
Tidal (Marine) Current	800+	
Tide	300+	
Thermal Gradient (OTEC)	10.000	
Salinity Gradient	2.000	

*)Twh = Tera Watt Hours

Berdasarkan bentuk atau model sistem energi laut yang terbanyak dimanfaatkan oleh beberapa negara atau industri adalah energi gelombang laut (*Ocean Wave*), hal ini disebabkan karena faktor ketersediaan gelombang laut yang lebih banyak, mudah cara beroperasi, lebih murah dari sisi produksi dan perawatan dibandingkan dengan sistem model

energi laut lainnya. Gambar 1 menjelaskan tentang banyaknya tipe energi laut yang dikembangkan oleh beberapa negara, di mana UK (United Kingdom) merupakan negara yang terbanyak yang menghasilkan berbagai model yaitu sebanyak 40 model. Sayangnya Indonesia masih belum tercatat atau bisa dikata belum memanfaatkan energi laut secara menyeluruh. [6]



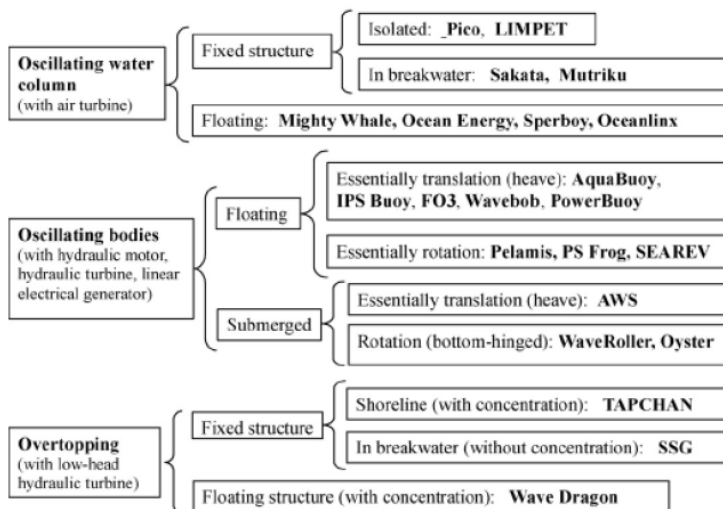
Gambar 2.1 Jumlah Model (Sistem) yang dikembangkan oleh beberapa negara

2.2 Energi Gelombang Laut

Dilihat dari kondisi geografis negara Indonesia yang sebagian besar wilayahnya terdiri dari lautan, maka dilakukan pengembangan pemanfaatan energi kelautan dengan memanfaatkan kekuatan ombak sebagai energi pembangkit listrik. Pada dasarnya prinsip kerja teknologi yang mengkonversi energi gelombang laut menjadi energi listrik adalah mengakumulasi energi gelombang laut untuk memutar turbin generator. Karena itu, sangat penting memilih lokasi yang secara topografi memungkinkan akumulasi energi.

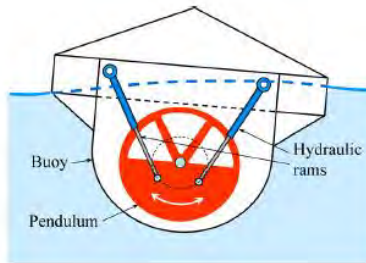
Pergerakan laut yang menghasilkan gelombang laut terjadi akibat dorongan pergerakan angin. Angin timbul akibat perbedaan tekanan pada 2 titik yang diakibatkan oleh respons pemanasan udara oleh matahari yang berbeda di kedua titik tersebut. Mengingat sifat tersebut maka energi gelombang laut dapat dikategorikan sebagai energi terbarukan.

Keuntungan pemanfaatan energi gelombang ini adalah: Energi ini bebas, tidak perlu bahan bakar, tidak ada limbah/polusi; Sumber energi yang dapat diperbaharui; Dapat menghasilkan banyak energi; Biaya tidak mahal. Sedangkan kelemahannya adalah: Sangat tergantung dengan karakteristik gelombang, kadang-kadang bisa menghasilkan energi yang besar, kadang-kadang tidak ada; Perlu satu lokasi yang tepat dimana gelombangnyakonsisten besar; Alatnya harus kokoh sehingga tahan terhadap kondisi cuaca yang buruk. Energi gelombang laut beberapa dekade terakhir ini memiliki tiga (3) karakter cara penangkapan energi gelombang laut, lebih detailnya dapat dilihat di gambar 2.



Gambar 2.2 Flowchart penangkapan energi gelombang laut[8]

Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang dengan sistem pendulum yang akan diteliti ini termasuk dalam karakter *Oscillating Bodies* dengan tipe gerakan bersifat *floating* dengan sistem transmisi berupa gerakan rotasi. Model PLTGL yang memiliki kemiripan dengan sistem pendulum ini adalah model SEAREV. seperti gambar 3 yang dikembangkan oleh Ecole Centrale de Nantes, Prancis. Dimana cara kerjanya yaitu memanfaatkan gerakan pitching benda apung (buoy/kapal/ponton) yang dipasang pendulum vertikal dan dihubungkan dengan hydraulic pump untuk memutar generator. [7]



Gambar 2.3 Model SEAREV berupa pendulum vertikal[8]

Sedangkan model PLTGL sistem pendulum yang akan diteliti berbeda dengan model SEAREV, dimana perbedaannya adalah pendulum diletakan horisontal dideck dan bergerak rotasi yang terhubung dengan generator.

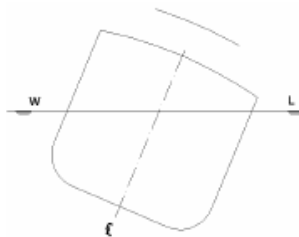


Gambar 2.4 PLTGL Sistem Pendulum yang diletakan vertikal diatas ponton dan lampu sebagai beban.[8]

Cara mendefinisikan besar energi yang berpotensi pada suatu gelombang laut dapat dinyatakan sebagai daya per unit panjang (*along the wave crest or along the shoreline direction*). Pada daerah pantai yang memiliki pola gelombang yang baik kira-kira memiliki daya antara 20 – 70 kwh/meter. Bila Indonesia bisa memanfaatkan sekitar 0,1% dari 81.290 km panjang garis pantai atau sekitar 81,3 km sudah mampu menghasilkan daya 1,6 giga watt, bila terkena faktor efisiensi 50 % saja bisa menghasilkan 800 mega watt yang sangat menjanjikan.[8]

2.3 Stabilitas

Stabilitas merupakan kemampuan suatu benda untuk menyeimbangkan posisi ketika melayang atau mengapung agar dapat kembali ke posisi tegak ketika miring (oleng).



Gambar 2. 5 Stabilitas Melintang[8]

Kemampuan benda agar bisa seimbang dibagi menjadi dua macam stabilitas, yaitu :

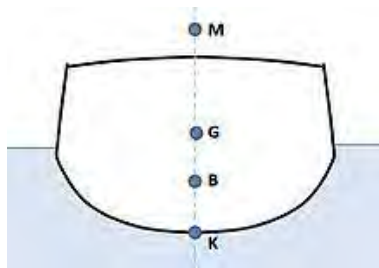
- a. Stabilitas memanjang (waktu terjadi Trim).
- b. Stabilitas melintang (waktu terjadi olengan)
lihat gambar diatas. Pada umumnya stabilitas memanjang tidak perlu diperhitungkan karena biasanya dianggap cukup besar. Yang perlu mendapat perhatian pada waktu merencanakan benda adalah stabilitas melintangnya. Stabilitas pada sudut – sudut oleng yang $c \leq 3$ j u w . ju kita mengenal juga :

- a. Stabilitas statis.
- b. Stabilitas dinamis.

Baik stabilitas statis maupun stabilitas dinamis ada yang positif, negative dan nol.

2.4 Stabilitas

2.4.1 Titik Stabilitas pada Benda di Perairan

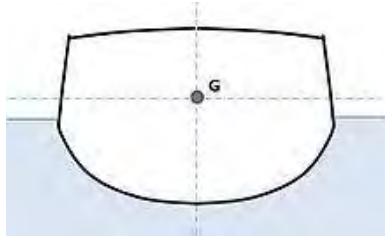


Gambar 2. 6 Titik Stabilitas pada Benda Di Perairan[8]

Pada benda yang mengapung titik stabilitas ini sangat penting untuk dikenal karena perubahan posisi titik – titik ini akan sangat berpengaruh terhadap kembali atau tidaknya benda ketika mengalami keolengan. Adapun definisi daripada titik stabilitas pada gambar diatas:

- **Titik Berat (*Centre of Gravity*) (G)**

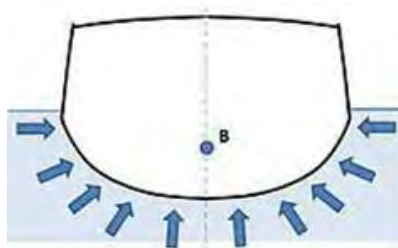
Secara definisi, titik berat (G) ialah titik tangkap dari semua gaya–gaya yang bekerja ke bawah. Letak titik G pada benda kosong ditentukan oleh hasil percobaan stabilitas. Perlu diketahui bahwa, letak titik G tergantung daripada pembagian berat di benda. Jadi selama tidak ada berat yang di geser/ditambah/dikurangi, titik G tidak akan berubah walaupun benda oleng atau mengangguk/trim.[8]



Gambar 2. 7 Letak Titik Berat Benda Di Perairan[8]

- **Titik Apung (*Centre of Buoyancy*) (B)**

Titik apung (center of buoyance) dikenal dengan titik B dari sebuah benda, merupakan titik tangkap dari resultan gaya-gaya yang menekan tegak ke atas dari bagian benda yang terbenam dalam air. Titik tangkap B bukanlah merupakan suatu titik yang tetap, akan tetapi akan berpindah-pindah oleh adanya perubahan sarat dari benda. Dalam stabilitas benda, titik B inilah yang menyebabkan benda mampu untuk tegak kembali setelah mengalami senget. Letak titik B tergantung dari besarnya senget benda (bila senget berubah maka letak titik B akan berubah / berpindah. Bila benda menyenget titik B akan berpindah kesisi yang rendah.



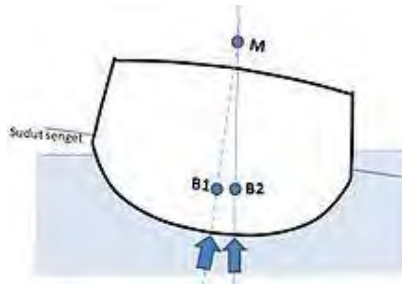
Gambar 2. 8 Letak Titik Apung Benda

- **Titik Metasentris(M)**

Titik metasentris atau dikenal dengan titik M dari sebuah benda, merupakan sebuah titik semu dari batas di mana titik G tidak boleh melewati di atasnya agar supaya benda tetap mempunyai stabilitas yang positif (stabil). Meta artinya

berubah-ubah, jadi titik metasentris dapat berubah letaknya dan tergantung dari besarnya sudut senget.

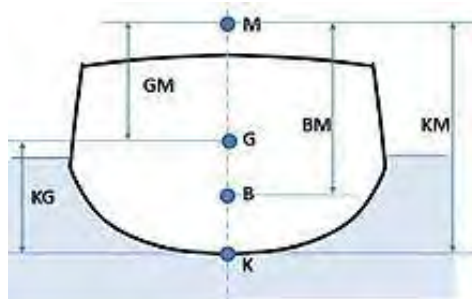
Apabila benda senget pada sudut kecil (tidak lebih dari 150), maka titik apung B bergerak di sepanjang busur di mana titik M merupakan titik pusatnya di bidang tengah benda (centre of line) dan pada sudut senget yang kecil ini perpindahan letak titik M masih sangat kecil, sehingga masih dapat dikatakan tetap.



Gambar 2. 9 Letak Titik Metasentris

2.4.2 Ukuran Dalam Stabilitas

Ada beberapa ukuran-ukuran yang sering digunakan dalam stabilitas, hal ini lah yang nantinya akan di penggunaan untuk merancang stabilitas pada Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandulan seperti ditunjukkan dalam gambar berikut.



Gambar 2.10 Ukuran-Ukuran Yang Digunakan Dalam Pehitungan Stabilitas

- KG – Adalah tinggi titik berat ke lunas / jarak / letak titik berat terhadap lunas

Nilai KB untuk kapal kosong diperoleh dari percobaan stabilitas (inclining experiment), selanjutnya KG dapat dihitung dengan menggunakan dalil momen. Nilai KG dengan dalil momen ini digunakan bila terjadi pemuatan atau pembongkaran di atas kapal dengan mengetahui letak titik berat suatu bobot di atas lunas yang disebut dengan vertical centre of gravity (VCG) lalu dikalikan dengan bobot muatan tersebut sehingga diperoleh momen bobot tersebut. Selanjutnya jumlah momen-momen seluruh bobot di kapal dibagi dengan jumlah bobot dan menghasilkan nilai KG pada saat itu.

- BM – Radius Metacentric

BM dinamakan jari-jari metasentris atau metacentris radius karena bila kapal mengoleng dengan sudut-sudut yang kecil, maka lintasan pergerakan titik B merupakan sebagian busur lingkaran di mana M merupakan titik pusatnya dan BM sebagai jari-jarinya. Titik M masih bisa dianggap tetap karena sudut olengnya kecil (100-150).

- KB (Tinggi Titik Apung dari Lunas)

Letak titik B di atas lunas bukanlah suatu titik yang tetap, akan tetapi berpindah-pindah oleh adanya perubahan sarat atau senget kapal. Menurut Rubianto (1996), nilai KB dapat dicari:

Untuk kapal tipe plat bottom, $KB = 0,50d$

Untuk kapal tipe V bottom, $KB = 0,67d$

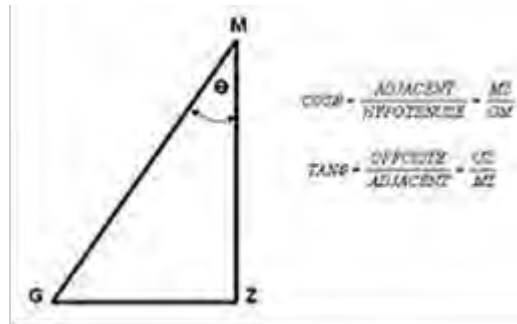
Untuk kapal tipe U bottom, $KB = 0,53d$

Di mana d = draft kapal

2.4.3 Segitiga Stabilitas

Bila suatu kapal senget maka titik apung akan bergerak sedangkannya titik berat (gravitasi) tidak berubah. Karena gaya apung dan gravitasi sama besar dan searah, tetapi kalau

kapal miring akan membentuk dua gaya yang paralel dengan arah yang berlawanan, mengakibatkan terjadi rotasi. Rotasi ini mengakibatkan kapal kembali ke posisi semula karena gaya apung dan gravitasi sama besar berlawanan arah akan saling menutup. Hal ini dikatakan sebagai pasangan (coupled) karena kedua gaya yang bekerja menghasilkan rotasi. Rotasi inilah yang menyebabkan terjadi keseimbangan kapal.



Gambar 2.11 Segitiga Gaya Apung, Gravitasi dan Lengan Penegak[8]

Jarak antara gaya apung dan gravitasi disebut sebagai lengan penegak. Pada gambar di atas lengan penegak merupakan garis yang ditarik dari titik gravitasi ke vektor gaya apung kapal. Untuk kemiringan yang kecil (0° sampai 7° ke 10° , metacenter tidak berubah), nilai lengan penegak (GZ) dapat diperoleh secara trigonometri.



Gambar 2.12 Lengan Penegak Pada Saat Kapal Senget

Dengan stabilitas awal (0o sampai 7o-10o) metacenter tidak berubah, dan fungsi sinus hampir linier (garis lurus) Oleh karena itu Lengan Penegak kapal < GZ proporsional terhadap ukuran tinggi metacenter, GM. Sehingga GM adalah ukuran awal stabilitas kapal.[8]

2.4.4 Kondisi Stabilitas

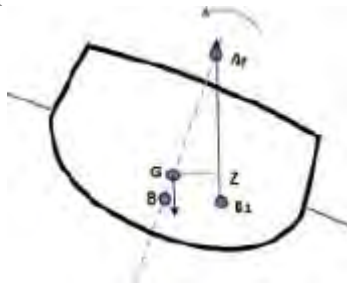
Posisi Titik gravitasi dan Metacentre menunjukkan indikasi awal stabilitas kapal. Kalau terjadi permasalahan yang mengganggu stabilitas kapal maka dikelompokkan dalam:

- a. Stabilitas positif
- b. Stabilitas netral
- c. Stabilitas negatif

Dari ketiga kondisi tersebut yang baik di gunakan untuk ponton adalah yang negatif, dimana memang

bertujuan untuk mengkondisikan ponton supaya tidak stabil. Hal ini dikarenakan, apabila ponton terlalu stabil maka akan mempengaruhi perputaran pendulum nantinya. Adapun penjelasan dari masing-masing kondisi adalah:

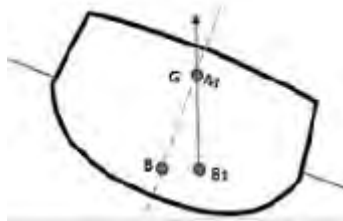
- a. Stabilitas positif



Gambar 2.13 Posisi stabilitas positif[8]

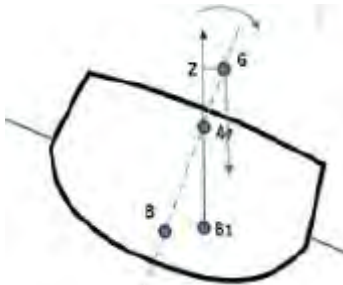
Metacenter berada diatas titik grafitasi. Kalau kapal senget atan membentuk lengan penegak, yang mendorong kapal tegak kembali.

b. Stabilitas netral

**Gambar 2.14** Posisi stabilitas netral

Metacenter berhimpit dengan titik grafitasi. Kalau kapal senget tidak membentuk lengan penegak, sampai metacenter berpindah setelah senget 70 – 100

c. Stabilitas negatif

**Gambar 2.15** Posisi stabilitas negatif[8]

Titik gravitasi kapal berada di atas metacenter, apabila kapal senget lengan penegak negatif terbentuk yang akan mengakibatkan kapal terbalik.[8]

2.5 Tinjauan Riset Sebelumnya

PLTGL sistem pendulum ini pertamakali diperkenalkan oleh Bapak Zamrisyaf sekitar tahun 2002 dengan uji coba tahap I, dimana uji coba ini hanya untuk membuktikan suatu ide, yang mana pergerakan pendulum akibat pengaruh dari fluktuasi gelombang laut hasilnya tidak begitu memuaskan,

karena pendulum tidak bergerak sesuai dengan yang diharapkan.

Uji coba II dilanjutkan pada tahun 2003 dimana pendulum dipasang vertikal dan sudah mulai dapat bergerak (bergoyang) sesuai dengan yang diharapkan. Dengan dibantu transmisi putaran yang dilengkapi double-freewheel untuk menjadikan gerakan bolak-balik menjadi putaran satu arah dan memutar roda gila yang terhubung dengan dinamo. Kelemahan uji coba ke II ini pendulum vertikal sering terganggu oleh arah datangnya gelombang laut yang tidak tegak lurus terhadap ponton.

Pada tahun 2006 muncul ide untuk menggunakan pendulum yang dipasang horisontal, dimana uji coba III gerakan pendulum bisa bergerak pada seluruh arah gelombang, dibandingkan dengan pendulum vertikal yang bergerak dengan satu arah gelombang. Dengan percobaan tahap ini gerakan pendulum sudah sangat memuaskan dan mampu bergerak rotasi sesuai dengan harapan. Ada fenomena yang menarik dari pendulum horisontal yaitu pada kondisi gelombang yang sama dilakukan percobaan dengan dua pendulum yang satu dengan lengan panjang dan yang satu lagi dengan lengan pendek, dan yang terjadi pendulum dengan lengan pendek dapat berotasi dengan cepat dan lengan panjang hanya bolak balik. Ketidak stabilan kondisi ini mendorong untuk di analisa secara ilmiah dimana sebelumnya hanya mencoba-coba.

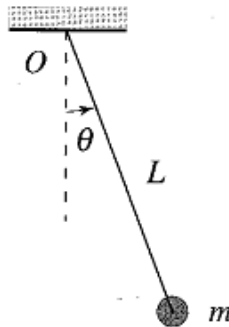
Pada tahun 2010 beliau Zamrisyaf ingin menggandeng perguruan tinggi untuk menganalisa secara ilmiah fenomena yang terjadi, dari sinilah ITS bekerja sama dengan beliau dan di sponsori oleh PT. PLN Puslitbang untuk menganalisa

secara ilmiah dan terukur [9]. Pada tahun tersebut ada dua faktor yang di analisa yaitu faktor :

1. Ponton
2. Pendulum horisontal

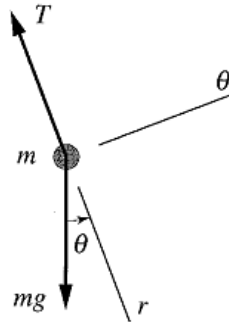
2.6 Teori Bandul Sederhana [10]

Sebuah pendulum sederhana yang terdiri dari partikel massa m yang bergantung pada tali atau benang dengan panjang L . perputaran sudut pendulum dinotasikan dalam $\theta(t)$ sebagai fungsi waktu. Tegangan tali diekspresikan sebagai notasi T .



Gambar 2.16 *Pendulum Sederhana [11]*

Persamaan gerak dan tegangan T dapat diperoleh dengan menggunakan hokum Newton ke-2 dan menjabarkannya dalam komponen radial dan transversal.



Gambar 2.17 *free body diagram dari massa pendulum sederhana [11]*

Dari gambar di atas dapat ditulis persamaan gerak pada komponen radial dan transversal, r dan θ , sebagai berikut :

$$\sum F_r = m \cdot g \cdot \cos \theta - T = m \cdot a_r \quad (2.1)$$

$$\sum F_\theta = -m \cdot g \cdot \sin \theta = m \cdot a_\theta \quad (2.2)$$

Dengan $r = L = \text{konstan}$, maka $\dot{r} = \ddot{r} = 0$ sehingga didapat persamaan berikut :

$$a_r = \ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = -L\dot{\theta}^2 \quad (2.3)$$

$$a_\theta = r\ddot{\theta} + 2\dot{r}\dot{\theta} = L\ddot{\theta} \quad (2.4)$$

Mensubstitusikan persamaan (2.4) ke dalam persamaan (2.2), didapat persamaan gerak differensial sebagai berikut :

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{L} \sin \theta = 0 \quad (2.5)$$

Dapat disimpulkan bahwa pergerakan pendulum tidak bergantung pada massa. Tetapi di lain hal, persamaan (2.1) dan persamaan

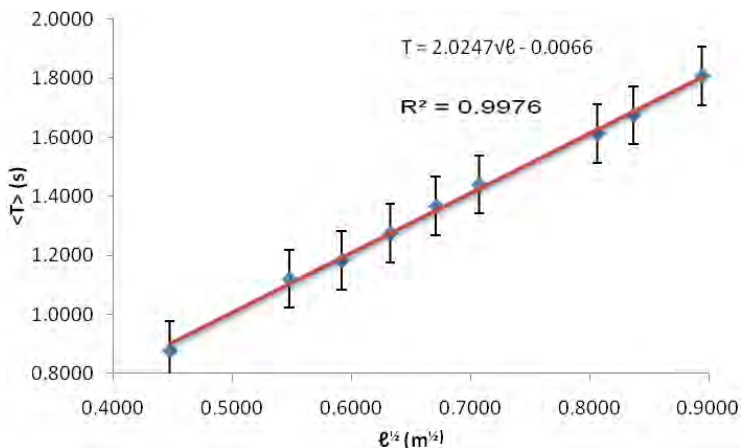
(2.3) memberikan persamaan tegangan pada tali pendulum sebagai berikut :

$$T = m.g.\cos\theta + m.L.\dot{\theta}^2 \quad (2.6)$$

Untuk persamaan periode ayunan bandul dapat dinyatakan sebagai berikut, (T) periode, (L) panjang lengan bandul dan (g) gravitasi :

$$T \approx 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (2.7)$$

Dari persamaan (2.6) menunjukkan bahwa semakin panjang lengan yang terpasang maka gerakan bolak-balik bandul semakin lambat akibatnya periode semakin besar, sebaliknya semakin pendek lengan maka gerakan bolak-balik bandul semakin cepat akibatnya periode semakin kecil. Hal ini dapat dilihat di gambar di bawah ini.



Gambar 2.18 Hubungan nilai rata periode dengan akar panjang lengan [10]

2.7 PLTGL-SB

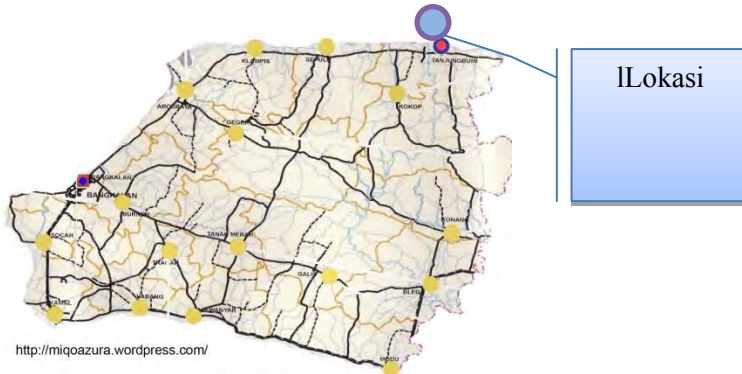
Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut – Sistem Bandulan (PLTGL-SB) adalah salah satu pembangkit listrik yang memanfaatkan gelombang laut sebagai sumber energinya. Ini berdasarkan penelitian Zamrisyaf, pegawai pusat penelitian dan pengembangan Perusahaan Listrik Negara (PLN) sejak tahun 2002. Temuan Zamrisyaf telah mendapatkan penyempurnaan lewat kerjasama dengan Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, diantaranya telah menghasilkan ukuran – ukuran ponton, berat bandul dan panjang lengan bandul serta daya dan putaran yang dihasilkan.

Cara kerja PLTGL-SB ini cukup menarik. Ponton yang berfungsi sebagai kapal mengangkut bandul yang terintegrasi dengan dinamo. Untuk menghasilkan putaran dinamo yang maksimal, bandul dibantu dengan alat transmisi *double-freewheel* dan diintegrasikan dengan bantuan rantai. Setiap gerakan air laut akan menggoyangkan bandul sehingga menggerakkan *double-freewheel* untuk memutar dinamo menghasilkan listrik.

Energi yang dihasilkan alat ini sangat tergantung dari gerakan ponton. Gerakan yang terjadi pada ponton adalah gerakan rotasi dan translasi, gerakan ini muncul sebagai akibat dari tabrakan dengan permukaan gelombang atau tekanan naik turun di bawah permukaan laut.

2.8 Lokasi PLTGL – SB

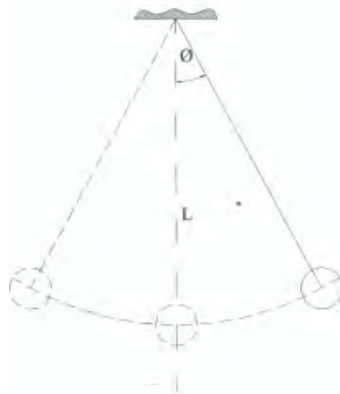
Dalam penelitian ini merencanakan peletakan PLTGL-SB di Tanjung Bumi, Bangkalan, Madura (Gambar 2.19). Alasan kenapa memilih Tanjung Bumi, Bangkalan, Madura yaitu kondisi dasar lautnya tidak banyak terumbu karang dan tidak terlalu landai sehingga dipilih sebagai lokasi penempatan pontoon PLTGL-SB.



Gambar 2.19 Peta Tanjung Bumi, Bangkalan, Madura.[12]

2.9 Teori Sistem Getaran [13]

Gerakan yang berulang dari gerakan sebelumnya dalam interval waktu tertentu disebut bergetar atau berisolasi. Contoh yang paling mudah adalah gerakan ayunan dari suatu pendulum. Dengan demikian teori getaran mempelajari gerakan benda atau bodi yang berisolasi serta gaya yang bekerja didalamnya.



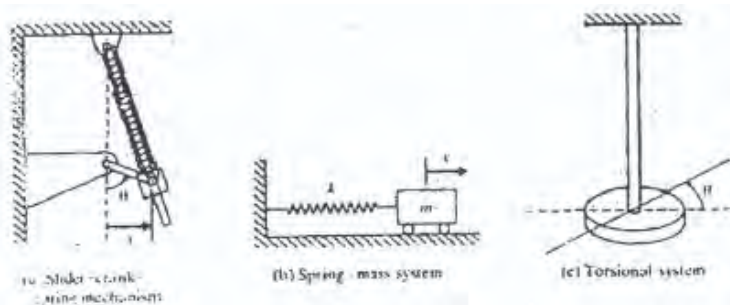
Gambar 2.20 Pendulum

Secara umum dalam sistem getaran terdapat kemampuan untuk menyimpan energi potensial yang disebabkan pegas atau elastisitas yang dimiliki sistem, serta kemampuan untuk

menyimpan energi kinetik akibat massa atau inersia yang dipunyai sistem. Disamping itu juga kemampuan untuk melepaskan energi secara berangsur-angsur akibat sifat redamanyang dimiliki sistem tersebut.

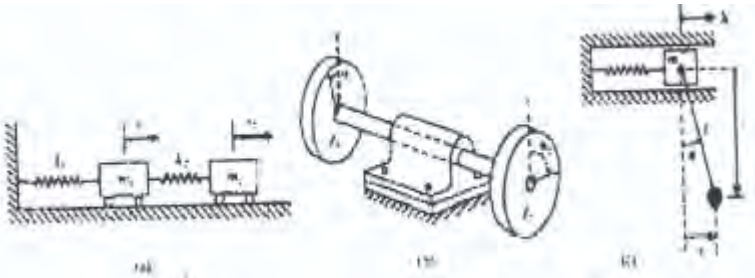
2.9.1 Derajat Kebebasan (Degree of Freedom) [13]

Derajat kebebasan adalah jumlah koordinat bebas (independent coordinates) yang dibutuhkan untuk menggambarkan posisi dari sistem secara lengkap terhadap suatu referensi yang dianggap diam. Secara garis besar derajat kebebasan dapat dibagi menjadi dua yaitu satu derajat kebebasan (single degree of freedom) untuk sistem yang gerakannya dapat digambarkan dengan satu koordinat dan multi derajat kebebasan (multi degree of freedom) untuk sistem yang gerakannya digambarkan oleh lebih satu koordinat.



Gambar 2.21 Sistem dengan satu derajat kebebasan

Pada gambar 2.21 (a) Silinder-crank-spring mechanism, gerakannya dapat digambarkan hanya dengan satu koordinat saja yaitu θ . Begitu pula halnya dengan gambar 2.4 (c) Torsional system, gerakannya juga bisa digambarkan dengan θ saja. Sedangkan pada gambar 2.4 (b) spring mass system, gerakannya dapat digambarkan dengan satu derajat kebebasan juga yaitu x .

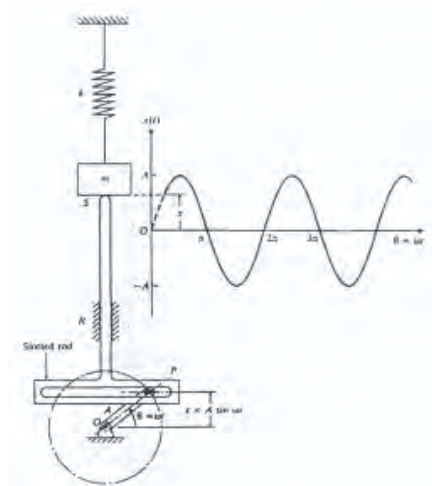


Gambar 2.22 Sistem dengan multi derajat kebebasan

Pada gambar 2.22 (a) ditunjukkan bahwa suatu sistem yang terdiri dari dua massa dan dua pegas memiliki dua derajat kebebasan yaitu X_1 dan X_2 . Kemudian pada gambar 2.22 (b) sistemnya juga mempunyai dua derajat kebebasan yaitu θ_1 dan θ_2 . Sedangkan pada gambar 2.22 (c) sistemnya mempunyai derajat kebebasan arah x dan θ

2.9.2 Gerakan Harmonis [13]

Gerakan osilasi yang berulang secara teratur dalam interval waktu yang sama disebut gerakan periodic (periodic motion). Sedangkan tipe yang paling sederhana dari gerakan periodic adalah gerakan harmonis (harmonic motion). Gambar 2.8 menunjukkan gerakan massa m akibat dari Scotch yoke mechanism merupakan contoh sederhana dari gerakan harmonis. Dalam sistem tersebut sebuah engkol dengan radius A berputar terhadap titik O dan pada ujung yang satunya yaitu titik P engkol meluncur pada slotted rod yang dapat bergerak bolak-balik pada vertical guide R . Pada saat engkol berputar dengan kecepatan sudut ω maka titik S pada slotted link dan masa m dari sistem pegas mass (spring-mass system) akan berpindah sejauh X dalam waktu tertentu.



Gambar 2.23 Scotch yoke mechanism

Perpindahan:

$$X = A \sin \theta = A \sin \omega t \quad (2.1)$$

Kecepatan:

$$\frac{dx}{dt} = \omega A \cos \omega t \quad (2.2)$$

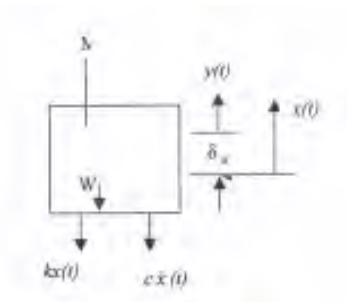
Percepatan:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 A \sin \omega t = -\omega^2 x \quad (2.3)$$

2.9.2 Persamaan Diferensial Sistem Gerakan [13]

Suatu sistem yang mengalami eksitasi menunjukkan sebuah respons yang tergantung pada eksitasi natural karakteristik sistem. Baik eksitasi mula maupun eksitasi akibat gaya atau momen yang bekerja. Eksitasi mula diperoleh dari perpindahan atau kecepatan mula, atau keduanya, Pengaruh dari eksitasi mula adalah memberikan energi pada sistem yaitu energi potensial dalam perpindahan mula dan energi dalam hal kecepatan mula.

Setelah energi diberikan pada sistem sudah tidak ada lagi faktor eksternal yang berpengaruh pada sistem. Sedangkan gaya atau momen yang bekerja pada sistem seringkali disebut sebagai gaya/momen eksitasi. Sehingga dapat disimpulkan bahwa eksitasi mewakili faktor eksternal yang bekerja pada sistem, sedangkan karakteristik sistem sebagai faktor internal. Penyusunan komponen dan respon dari komponen juga menentukan formulasi matematis yang berhubungan dengan respon dari sistem keseluruhan terhadap eksitasi. Pada umumnya persamaan dalam bentuk persamaan diferensial gerakan. Persamaan gerakan dari sistem getaran diperoleh dari hukum kedua Newton. Alat dasar penurunan persamaan gerakan menggunakan hukum kedua Newton adalah Free Body Diagram (FBD) yaitu gambar dengan setiap massa yang terisolasi pada sistem termasuk gaya yang bekerja didalamnya.



Gambar 2.24 Free Body Diagram Model Sistem

Getaran bebas dengan damping secara umum ada tiga macam yaitu:

1. Underdamped System

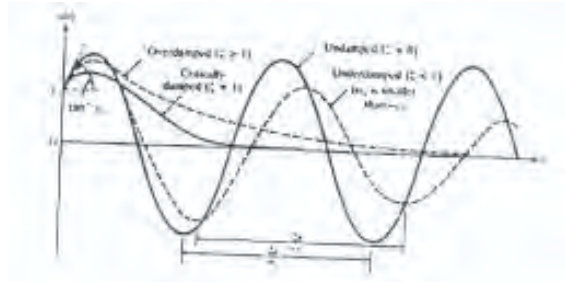
Pada getaran bebas dengan damping nilai damping rasionya, $\bar{\gamma} < 1$

2. Critically damped system

Pada getaran bebas dengan damping nilai damping rasionya, $\bar{\gamma} = 1$

3. Overdamped system

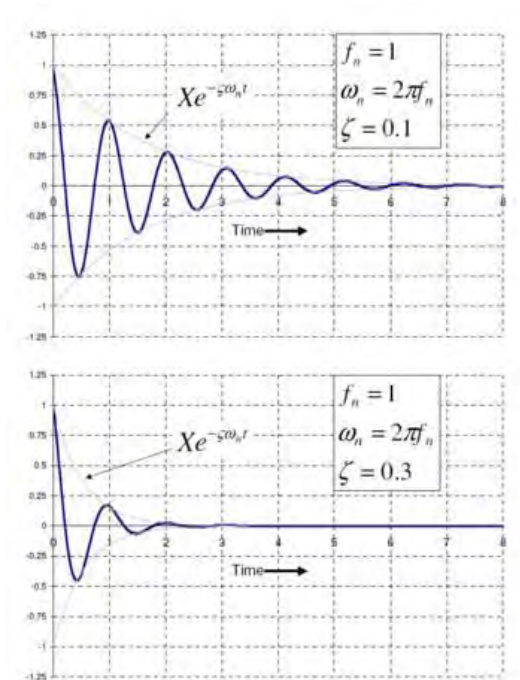
Pada getaran bebas dengan damping nilai damping ratio nya, $\bar{\zeta} > 1$



Gambar 2.25 Kondisi underdamped, critically damped & overdamped system

2.9.3 Penjelasan Redaman [13]

Pada sistem derajat kebebasan satu terdapat tiga parameter yaitu massa m , Konstanta redaman c , dan konstanta pegas k . Dari ketiga parameter tersebut konstanta redaman adalah yang tersulit dalam perhitungannya. Massa dapat diperoleh dengan menimbang, konstanta pegas didapat dengan cara menarik pegas dengan gaya tertentu. Konstanta redaman juga dihitung dengan cara yang sama seperti mencari konstanta pegas namun waktu yang dibutuhkan untuk mengalami perpanjangan juga dihitung. Penghitungan besar damping pada sistem 1 DOF yang tepat adalah amplitudo pada saat akan memenuhi satu periode getaran.



Gambar 2.26 Hasil Eksperimen dari Respon Sistem Teredam
 $x(t) = C e^{-\delta \omega_n t} \cos(\omega_d t - \theta)$ (2.12)

Dengan t_1 dan t_2 sebagai waktu pada saat puncak pertama dan kedua menunjukkan perpindahan puncak yang dimaksud sebagai x_1 dan x_2 dan memiliki ratio:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{x_1(t)}{x_2(t)} = \frac{C e^{-\delta \omega_n t_1} \cos(\omega_d t_1 - \theta)}{C e^{-\delta \omega_n t_2} \cos(\omega_d t_2 - \theta)} = \frac{e^{-\delta \omega_n t_1} \cos(\omega_d t_1 - \theta)}{e^{-\delta \omega_n t_2} \cos(\omega_d t_2 - \theta)}$$

Karena

$t_1 = t_2 + T$, dimana $T = 2\pi/\omega_d$ adalah periode dari osilasi teredam.

Dan karena

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \delta^2} \quad (2.14)$$

Maka akan diperoleh:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{x_1(t)}{x_2(t)} = \frac{e^{-\delta \omega_n t_1} \cos(\omega_d t_1 - \theta)}{e^{-\delta \omega_n (t_1 + T)} \cos(\omega_d (t_1 + T) - \theta)} = \frac{e^{\delta \omega_n T} \cos(\omega_d t_1 - \theta)}{\cos(\omega_d t_1 - \theta + 2\pi)}$$

$$\frac{x_1}{x_2} = e^{2\pi \delta / \sqrt{1 - \delta^2}}$$

Jika kedua ruas dilogaritma naturalkan

$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2} = \frac{2\pi \delta}{\sqrt{1 - \delta^2}}$$

δ dikenal dengan logarithmic decrement. Persamaan (2,16) dapat juga dituliskan dalam bentuk

$$\delta = \frac{\delta}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta^2}}$$

2.10 Fungsi-fungsi SolidWork [14]

Solidwork merupakan software yang digunakan untuk membuat desain produk dari yang sederhana sampai yang kompleks seperti roda gigi, casing handphone, mesin mobil, dsb. software ini merupakan salah satu opsi diantara design software lainnya sebut saja catia, inventor, Autocad, dll. Namun bagi yang berkecimpung dalam dunia teknik khususnya teknik mesin dan teknik industri, file ini wajib dipelajari karena sangat sesuai dan prosesnya lebih cepat daripada harus menggunakan autocad. File dari solidwork ini bisa di ekspor ke software analisis semisal Ansys, FLOVENT, dll. Desain kita juga bisa disimulasikan, dianalisis kekuatan dari desain secara sederhana, maupun dibuat animasinya.

SolidWorks dalam penggambaran / pembuatan model 3D menyediakan feature-based, parametric solid modeling. Feature-based dan parametric ini yang akan sangat mempermudah bagi user-nya dalam membuat model 3D. karena hal ini akan membuat kita sebagai user bisa membuat model sesuai dengan intiusi kita.

2.10.1 Tampilan SolidWorks [14]

Tampilan software SolidWorks tidak jauh berbeda dengan software–software lain yang berjalan diatas windows, jadi tidak ada yang akan merasa aneh dengan tampilan dari SolidWorks. Gambar di bawah merupakan tampilan awal dari SolidWorks. SolidWorks menyediakan 3 templates utama yaitu:

1. Part

Adalah sebuah object 3D yang terbentuk dari feature – feature. Sebuah part bisa menjadi sebuah komponen pada suatu assembly, dan juga bisa digambarkan dalam bentukan 2D pada sebuah drawing. Feature adalah bentukan dan operasi – operasi yang membentuk part. Base feature merupakan feature yang pertama kali dibuat. Extension file untuk part SolidWorks adalah .SLDPRT.

2. Assembly

Adalah sebuah document dimana parts, feature dan assembly lain(Sub Assembly) dipasangkan/ disatukan bersama. Extension file untuk SolidWorks Assembly adalah .SLDASM.

3. Drawing

Adalah templates yang digunakan untuk membuat gambar kerja 2D/2D engineering Drawing dari single component (part) maupun Assembly yang sudah kita buat. Extension file Untuk SolidWorks Drawing adalah .SLDDRW.

2.10.2 Fasilitas Solidworks yang dipakai [14]

Ada beberapa fasilitas solidworks yang dimiliki oleh solidworks, diantaranya :

a. Motion analysis

SolidWorks Motion adalah alat prototipe virtual yang menyediakan gerak kemampuan simulasi untuk memastikan fungsi desain dengan benar.

b. Static stress simulation

SolidWorks Simulasi menggunakan formulasi displacement dari metode elemen hingga untuk menghitung displacements komponen, strain, dan stress di bawah beban internal dan eksternal. Geometri dengan analisis didiskritisasi menggunakan tetrahedral (3D), elemen segitiga (2D), dan balok, dan diselesaikan menggunakan sparse langsung atau iteratif. SolidWorks Simulasi dapat menggunakan salah satu h atau p adaptif tipe elemen, memberikan keuntungan besar untuk desainer dan insinyur sebagai metode adaptif memastikan bahwa solusi telah berkumpul.

2.10.3 Faktor Keamanan (Factor of Safety) [14]

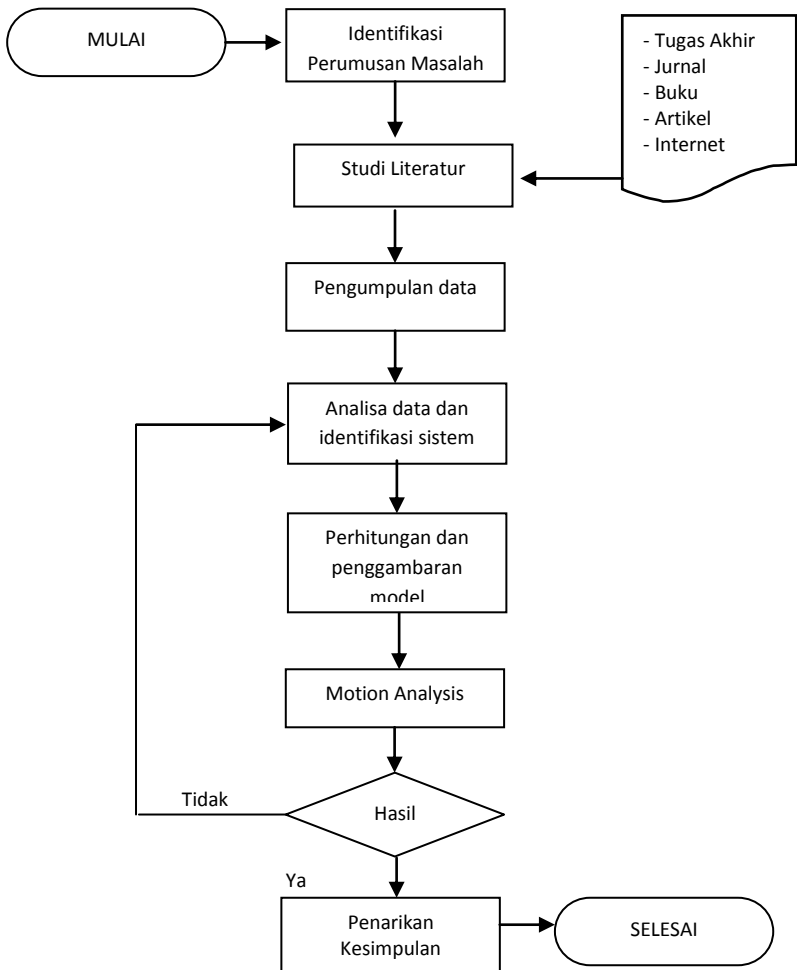
Adalah patokan utama yang digunakan dalam menentukan kualitas suatu produk. Patokannya, jika nilai FOS minimal kurang dari 1, maka produk tersebut kualitasnya jelek, tidak aman untuk dikonsumsi, cenderung membahayakan, sebaliknya jika nilai FOS lebih dari 1 (biasanya antara 1 – 3) maka produk tersebut berkualitas baik, aman dan layak dikonsumsi.

Namun apabila nilai FOS minimal mencapai 3 digit atau lebih (misal 100 atau lebih) maka produk tersebut aman, berkualitas baik namun harganya sangat mahal dan cenderung berbobot besar, karena material yang digunakan terlalu banyak.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III METODOLOGI

Di bawah ini merupakan flowchart diagram metodologi pengerjaan Tugas Akhir, dimana output yang diharapkan ialah berupa Damping Pendulum terhadap sudut dan waktu.



Gambar 3.1 Flow Chart Metodologi Penelitian

3.1 Identifikasi dan Perumusan Masalah

Tahapan pertama kali dalam menyelesaikan penulisan ini adalah mengidentifikasi masalah yang sekiranya dapat dijadikan sebuah gagasan ide dalam mengerjakan penulisan tugas akhir ini dan belum pernah ada judul tugas akhir sebelumnya. Setelah mendapatkan gagasan ide tersebut, langkah selanjutnya adalah merumuskan permasalahan yang perlu dibahas apa saja yang menghubungkan dengan judul tugas akhir tersebut.

Dalam penulisan tugas akhir ini untuk perumusan masalahnya adalah bagaimana merancang desain pendulum vertikal dan simulasi pergerakan sebuah sistem pendulum dengan variasi pembebanan pada bandul terhadap variasi sudut yang ditentukan yang akan menghasilkan sebuah grafik damping yaitu perbandingan antara banyaknya jumlah simpangan yang terjadi terhadap lama waktu berhenti sampai pada di titik nol.

3.2 Pemahaman Dasar Teori

Langkah selanjutnya yang akan dilakukan dalam penulisan ini adalah melakukan pemahaman dasar teori yang bersumber pada berbagai literature seperti buku-buku penunjang, tugas akhir sebelumnya, jurnal, internet dan artikel tentang damping analisis. Dalam masa pemahaman materi ini terdapat tujuan yang harus dicapai yaitu definisi, proses perhitungan dan dimensi terkait bandul, spur gear, rantai, belt dan poros yang sudah dijelaskan pada bab sebelumnya.

3.3 Pengumpulan Data

Merupakan tahapan dimana pengumpulan data berupa data tetap dan data variasi. Berikut penjelasannya

a. Data tetap

- Massa nod = 85 kg
- Panjang nod = 2.05 m
- Radius disk = 0.15 m

b. Data variasi

- Massa disk = 300 kg, 400 kg, 500 kg
- Sudut kemiringan = $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, \dots, 70^\circ$

3.4 Penggambaran Model

Penggambaran model komponen di sini akan menggunakan program Solidworks dengan tahapan untuk penggambaran kerangka struktur, pendulum vertikal, bandul pemberat dan poros dilakukan pada *part section*. Setelah itu adalah penggabungan semua komponen pada *assembly section* yang kemudian di-*mate* semua komponen tersebut agar menjadi model sistem pendulum bandul vertikal.

3.5 Motion Analysis

Setelah model digambar di SolidWorks, maka dilakukan *motion analysis* atau analisa gerakan Pendulum Vertikal yang dipengaruhi oleh massa pemberat dan variasi sudut. Disini dicari simpangan pendulum bandul yang dihasilkan akibat pengaruh massa pemberat dari bandul.

3.6 Analisa Data dan Pembahasan

Setelah dilakukan simulasi menggunakan motion analysis maka tahap selanjutnya adalah menganalisa data dan pembahasan yang tentunya dalam tahap ini dilakukan proses pengolahan data yang bersumber pada hasil gerakan pendulum terhadap sudut dan massa bandul terhadap sudut yang di variasikan akan didapat jumlah simpangan yang terjadi dan waktu lama berhenti sampai pada titik nol.

3.7 Pengambilan Kesimpulan

Apabila perhitungan dan analisa sesuai harapan maka tahapan terakhir yaitu pengambilan kesimpulan yang semua

analisa tersebut di atas tentang bagaimana meracancang sistem kerja bandulan pendulum vertikal secara optimal.

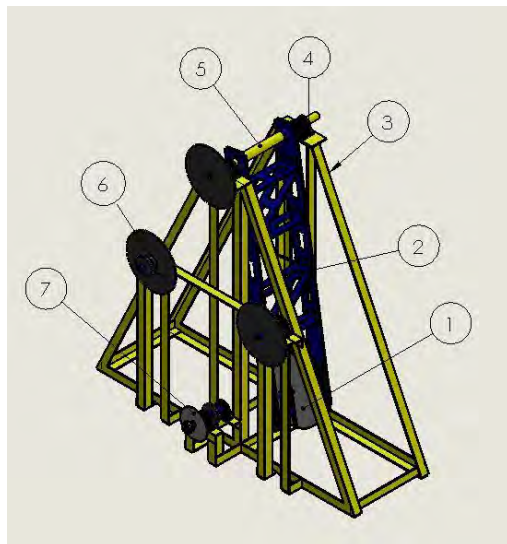
BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Umum

Pada bab ini akan diuraikan pemodelan dan pengujian simulasi motion analisis pendulum vertikal pada tiap-tiap variasi sudut. Pembuatan bab ini didasarkan pada bab III-metodologi.

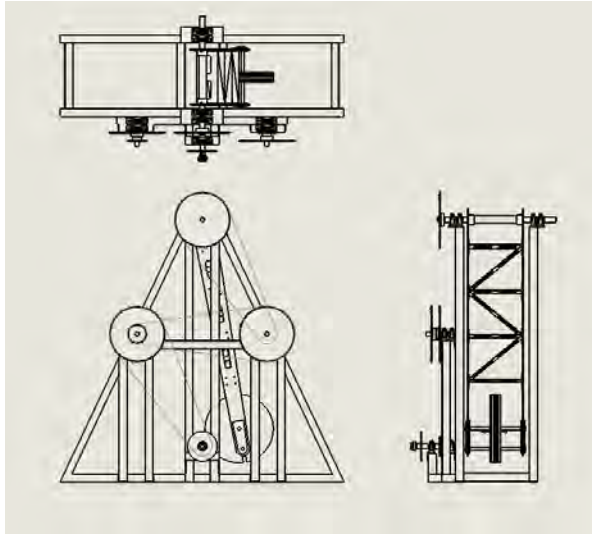
4.2 Geometri Konstruksi & Pendulum



Gambar 4.1 Model 3D PLTGL-SB

Keterangan :

1. Pendulum Bandul
2. Lengan Pendulum
3. Konstruksi
4. Bearing
5. Poros
6. Gear Transmisi
7. Transmisi ke Generator



Gambar 4.2 Drawing 2D PLTGL – SB Detail View

Beberapa parameter yang akan digunakan untuk pengujian simulasi motion analisis pendulum vertikal adalah dihasilkan oleh dari sudut dan massa bandul yaitu :

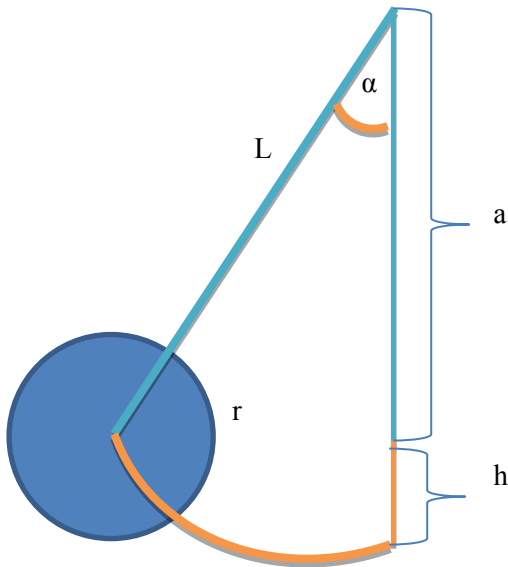
a. Data tetap

- Massa rodd (m) = 85 kg
- Panjang rodd (L) = 2.05
- Radius disk (r) = 0.15 m

b. Data variasi

- Massa disk = 100 kg, 200 kg, 300 kg
- Sudut kemiringan = $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$

Setelah mengetahui data yang akan digunakan untuk perhitungan simulasi maka langkah selanjutnya yaitu mengetahui persamaan-persamaan yang akan digunakan. Berikut penjelasannya :



Gambar 4.3 Sketsa Pendulum

- a. Persamaan tinggi bandul

$$h = La (1 - \cos \alpha) \quad (4.1)$$

$$La = L + r$$

h = tinggi antara pusat disk dengan alas bandul (m)

La = nilai panjang hasil penjumlahan antara panjang
lengan dengan radius disk (m)

L = panjang lengan (m)

r = radius disk (m)

- b. Persamaan torsi

$$T = m \cdot La \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (4.2)$$

T = torsi (Nm)

m = massa (kg)

La = nilai panjang hasil penjumlahan antara

panjang lengan dengan radius disk (m)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

c. Momen inersia rodd

$$I_{rodd} = 1/3 \cdot m_{rodd} \cdot La^2 \quad (4.3)$$

I_{rodd} = Momen inersia lengan bandul ($kg.m^2$)

m_{rodd} = massa lengan (kg)

La = nilai panjang hasil penjumlahan antara panjang lengan dengan radius disk (m)

d. Momen inersia disk

$$I_{disk} = m_{disk} \cdot La^2 \quad (4.4)$$

I_{disk} = Momen inersia massa bandul ($kg.m^2$)

m_{disk} = massa bandul (kg)

La = nilai panjang hasil penjumlahan antara panjang lengan dengan radius disk (m)

e. Putaran sudut natural

$$\omega_n = \sqrt{\frac{(1/2 m_n + m_d) g \cdot La}{(1/3 m_n + m_d) La^2}} \quad (4.5)$$

ω_n = Putaran sudut natural (rad/s)

m_{rodd} = massa rodd (kg)

m_{disk} = massa disk (kg)

g = percepatan gravitasi (m/s^2)

La = nilai panjang hasil penjumlahan antara panjang lengan dengan radius disk (m)

f. Putaran sudut

$$\omega = \frac{\sqrt{2 g h}}{La} \quad (4.6)$$

- ω = Putaran sudut (rad/s)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- h = tinggi antara pusat disk dengan alas bandul (m)
- La = nilai panjang hasil penjumlahan antara panjang lengan dengan radius disk (m)

g. *Revolution per Minute*

$$N = \omega \cdot 9,5493 \quad (4.7)$$

- N = putaran anguler
- ω = Putaran sudut (rad/s)

h. Kecepatan

$$V = \sqrt{2gh} = \omega \cdot La \quad (4.8)$$

- V = Kecepatan sudut (m/s)
- g = percepatan gravitasi (m/s^2)
- h = tinggi antara pusat disk dengan alas bandul (m)
- ω = Putaran sudut (rad/s)
- La = nilai panjang hasil penjumlahan antara Panjang lengan dengan radius disk (m)

i. Energi kinetic

$$Ek = 0,5 \cdot I_{\text{sistem}} \cdot \omega^2 \quad (4.7)$$

$$I_{\text{sistem}} = I_{\text{disk}} + I_{\text{rodd}}$$

- Ek = Energi kinetic (J)
- I_{sistem} = Momen inersia yang nilainya didapat dari penjumlahan momen inersia disk dan momen inersia rodd (kg.m^2)
- ω = Putaran sudut (rad/s)

j. Daya output dari poros bandul

$$\text{SHP} = ((T_{\text{sistem}} \times \omega) / 1000) / 1.341 \quad (4.8)$$

$$T_{\text{sistem}} = T_{\text{rodd}} + T_{\text{disk}}$$

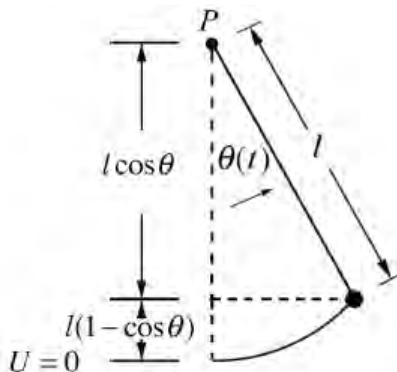
SHP = Power shaft yang keluar dari bandul (Hp)

T_{sistem} = Torsi yang bernilai dari penjumlahan torsi rodd dan torsi disk

ω = Putaran sudut (rad/s)

4.3 Perhitungan Bandul

Untuk menghitung perhitungan bandul terhaiat daya dan torsi output terlebih dahulu dilakukan penggambaran sketsa dari bandul atau *freebody diagram* bandul. Setelah mengetahui *freebody diagram* bandul, langkah selanjutnya yaitu menghitung torsi bandul, kecepatan sudut dan daya yang dihasilkan oleh simpangan bandul. Berikut model free body diagramnya :



Gambar 4. 4 Freebody diagram bandul

4.3.1 Perhitungan Tinggi Simpangan Bandul

Bandul yang bergerak akibat pergerakan gelombang laut yang menggerakkan ponton dapat menghasilkan tinggi simpangan yang berbeda-beda. Hal ini disesuaikan sudut simpangan yang terjadi. Berikut contoh perhitungannya :

$$h = La - La \cos \alpha$$

$$La = L + r$$

$$La = 2,05 + 0,15$$

$$La = 2,2$$

$$\tau = \tau_{lengan} + \tau_{bandul}$$

$$h = 2,2 - 2,2 \cos 70^\circ$$

$$h = 1,45 \text{ m}$$

4.3.2 Perhitungan Torsi Sistem

Torsi adalah gaya yang menyebabkan benda bergerak melingkar. Berikut contoh perhitungan torsi pada lengan (rodd) dan torsi pada massa bandul (disk) :

$$\tau_{rodd} = m_{rodd} \cdot 0,5 \cdot La \cdot g \cdot \sin \alpha$$

$$\tau_{rodd} = (85 \cdot 2,2 / 2 \cdot 9,8 \cdot \sin 70^\circ)$$

$$\tau_{rodd} = 860,41 \text{ Nm}$$

$$\tau_{disk} = m_{disk} \cdot La \cdot g \cdot \sin \alpha$$

$$\tau_{disk} = (85 \cdot 2,2 \cdot 9,8 \cdot \sin 70^\circ)$$

$$\tau_{disk} = 6073,45 \text{ Nm}$$

Maka nilai torsi sistem adalah

$$\tau_{sistem} = \tau_{rodd} + \tau_{disk}$$

$$\tau_{sistem} = 860,41 + 6073,45$$

$$\tau_{sistem} = 6933,86 \text{ Nm}$$

4.3.3 Perhitungan Momen Inersia

Momen inersia adalah sifat yang dimiliki benda untuk mempertahankan posisinya dari gerak berotasi. Berikut contoh perhitungan momen inersia pada lengan (rodd) bandul dan torsi pada massa bandul (disk):

$$I_{rodd} = \frac{1}{3} \cdot m_{rodd} \cdot La^2$$

$$I_{rodd} = \left(\frac{1}{3} \cdot 85 \cdot 2,2^2 \right)$$

$$I_{rodd} = 137,13 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{disk} = \frac{1}{3} \cdot m_{disk} \cdot La^2$$

$$I_{disk} = \left(\frac{1}{3} \cdot 300 \cdot 2,2^2 \right)$$

$$I_{disk} = 1452 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_{sistem} = I_{rodd} + I_{disk}$$

$$I_{sistem} = 137,13 + 1452$$

$$I_{sistem} = 1589,13 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

4.3.4 Perhitungan Putaran Sudut Natural

Putaran sudut natural pada bandul menggunakan perhitungan sebagai berikut :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{(\frac{1}{2}m_r + m_d)g \cdot La}{(\frac{1}{3}m_r + m_d)La^2}}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{(\frac{1}{2} \cdot 85 + 300) 9,8 \cdot 2,2}{(\frac{1}{3} \cdot 85 + 300) 2,2^2}}$$

$$\omega_n = 2,157 \text{ rad/s}$$

4.3.5 Perhitungan Putaran Sudut

Putaran sudut pada bandul menggunakan perhitungan sebagai berikut :

$$\omega = \frac{\sqrt{2 g h}}{La}$$
$$\omega = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,8 \cdot 1,45}}{2,2}$$
$$\omega = 2,421 \text{ rad/s}$$

4.3.6 Perhitungan RPM

RPM (revolution per minute) adalah jumlah putaran linier yang terjadi selama satu menit. Berikut contoh perhitungannya :

$$N = \omega \cdot 9,5493$$
$$N = 2,421 \cdot 9,5493$$
$$N = 23,121 \text{ rpm}$$

4.3.7 Perhitungan Kecepatan

Kecepatan yang terjadi adalah hasil perhitungan dari putaran sudut dengan panjang lengan. Berikut hasil perhitungannya :

$$V = \omega \cdot La$$
$$V = 2,421 \cdot 2,2$$
$$V = 5,327 \text{ m/s}$$

4.2.8 Perhitungan Energi Kinetik

Energi kinetik adalah energi yang disebabkan oleh gerakan suatu benda. Berikut adalah contoh perhitungannya :

$$Ek = 0,5 \cdot I_{sistem} \cdot \omega^2$$

$$Ek = 0,5 \times 1589,13 \times 2,421^2$$

$$Ek = 4657,894 \text{ Joule}$$

4.2.9 Daya yang Dihasilkan Bandul

Daya yang ditransmisikan pada bandul menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$P = \omega \times T$$

$$P = 2,421 \times 6933,86$$

$$P = 16788,22 \text{ watt}$$

$$P = 16,788 \text{ kw}$$

$$P = 22,513 \text{ hp}$$

Dari hasil perhitungan data variasi kemiringan sudut (simpangan) dan massa bandul, didapatkan tabel dan grafik dari torsi pada bandul sebagai berikut :

Tabel 4. 1 Torsi Pada Bandul Akibat Variasi Sudut dan Massa

Sudut (°)	Torsi (Nm)		
	m ₁ (300kg)	m ₂ (200kg)	m ₃ (100kg)
0	0.00	0.00	0.00
10	1277.48	904.50	531.51
20	2525.43	1788.08	1050.73
30	3692.15	2614.15	1536.15
40	4748.10	3361.80	1975.49
50	5656.37	4004.88	2353.38
60	6394.80	4527.71	2660.61
70	6933.86	4909.37	2884.89

Tabel 4. 2 Daya Pada Bandul Akibat Variasi Sudut dan Massa

Sudut (°)	P (Watt)		
	m ₁ (300kg)	m ₂ (200kg)	m ₃ (100kg)
0	0.00	0.00	0.00
10	467.00	330.65	194.30
20	1861.73	1318.16	774.59
30	4034.12	2856.27	1678.43
40	6855.59	4853.96	2852.33
50	10101.74	7152.33	4202.91
60	13496.74	9556.09	5615.43
70	16788.22	11886.55	6984.88

4.4 Pembahasan Simulasi Pendulum Vertikal

Beberapa parameter yang akan digunakan untuk pengujian simulasi motion analisis pendulum vertikal adalah dihasilkan oleh dari sudut dan massa bandul. Pengujian simulasi pertama yaitu membandingkan data sebagai berikut :

- a. Data tetap
 - Massa rodd (m) = 85 kg
 - Panjang rodd (L) = 2.05
 - Radius disk (r) = 0.15 m
- b. Data variasi
 - Massa disk = 100 kg, 200 kg, 300 kg
 - Sudut kemiringan = 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°
 - Material = Steel

4.4.1 Perbandingan Analisa Damping Pendulum Vertikal dengan sudut 10°

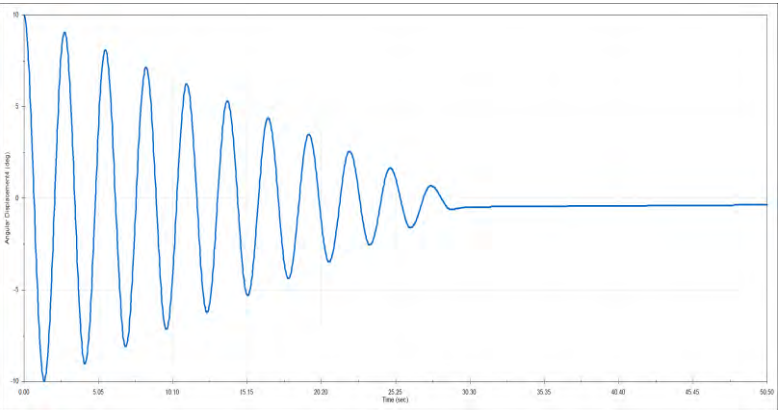
Berikut perbandingan analisa pendulum vertikal yang telah di simulasikan dengan motion analysis. didapat masing – masing grafik dan juga banyak-nya simpangan yang terjadi pada

tiap sudut 10° dengan massa pembebanan bandul sebesar 100 kg, 200 kg, dan 300 kg.



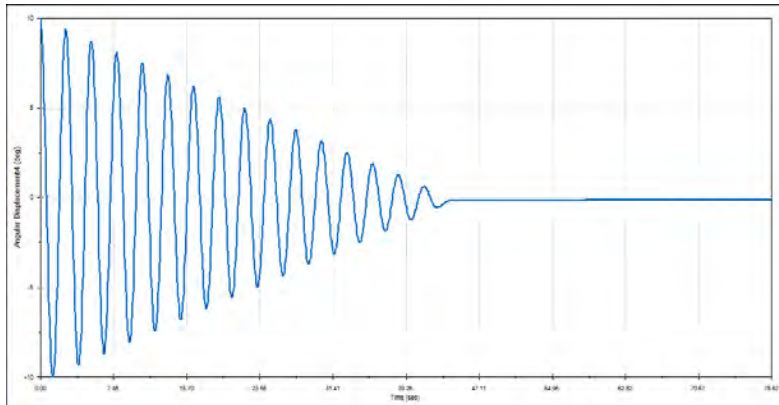
Gambar 4. 5 Grafik Damping dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 10°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 10° diperoleh data sebanyak 5 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-15.



Gambar 4. 6 Grafik Damping dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 10°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 10° diperoleh data sebanyak 10 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-30.



Gambar 4. 7 Grafik Damping dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 10°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 10° diperoleh data sebanyak 15 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-42.

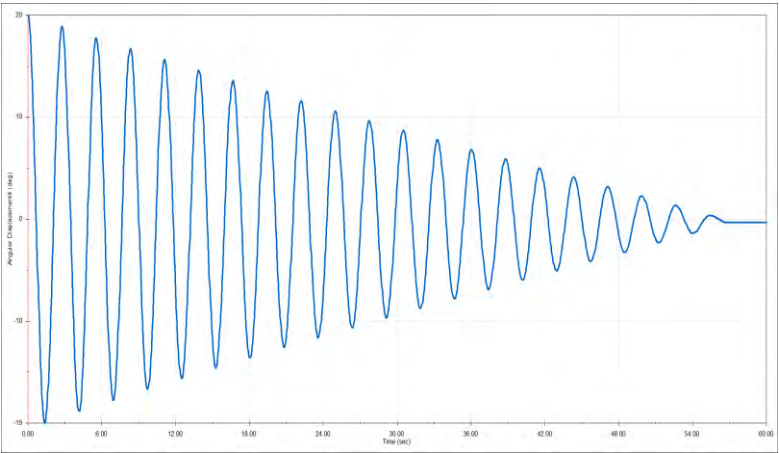
4.4.2 Perbandingan Analisa Damping Pendulum Vertikal dengan sudut 20°

Berikut perbandingan analisa pendulum vertikal yang telah di simulasikan dengan motion analysis. didapat masing – masing grafik dan juga banyak-nya simpangan yang terjadi pada tiap sudut 20° dengan massa pembebanan bandul sebesar 100 kg, 200 kg, dan 300 kg.



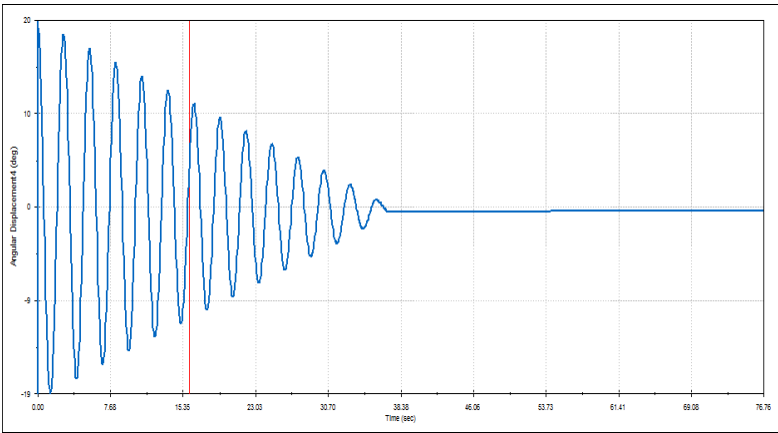
Gambar 4. 8 Grafik Damping dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 20°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 20° diperoleh data sebanyak 10 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-30.



. Gambar 4. 9 Grafik Damping dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 20°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 20° diperoleh data sebanyak 20 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-58.

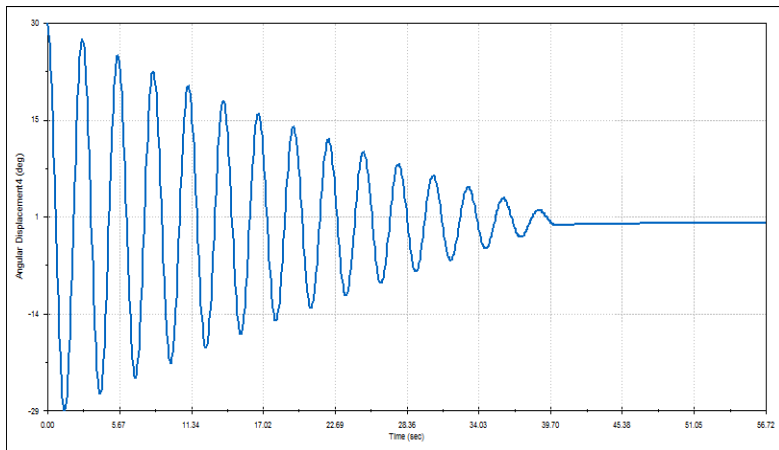


. Gambar 4. 10 Grafik Damping dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 20°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 20° diperoleh data sebanyak 30 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-69.

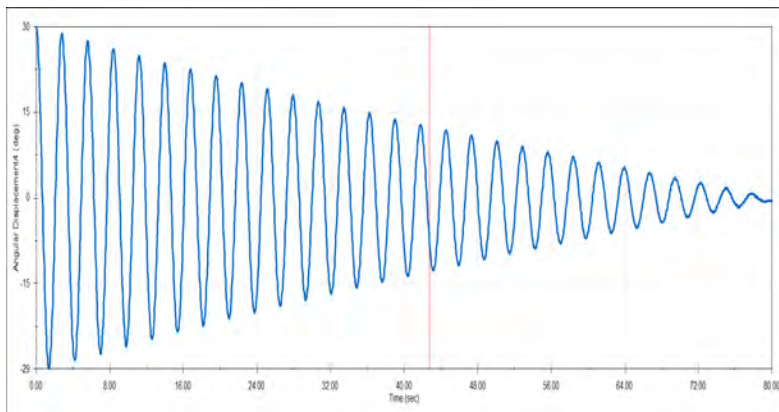
4.4.3 Perbandingan Analisa Damping Pendulum Vertikal dengan sudut 30°

Berikut perbandingan analisa pendulum vertikal yang telah di simulasikan dengan motion analysis. didapat masing – masing grafik dan juga banyak-nya simpangan yang terjadi pada tiap sudut 30° dengan massa pembebanan bandul sebesar 100 kg, 200 kg, dan 300 kg.



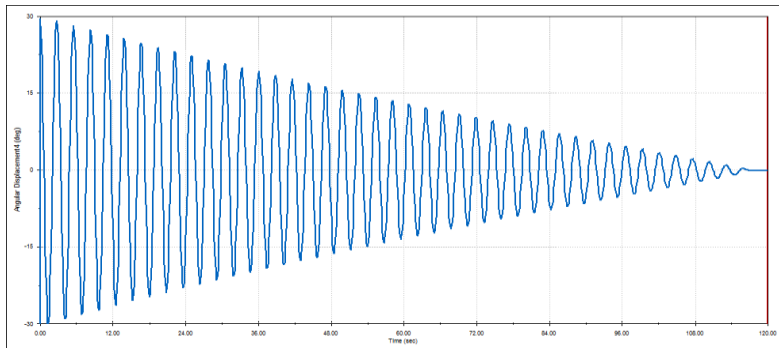
Gambar 4. 11 Grafik Damping dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 30°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 30° diperoleh data sebanyak 14 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-41.



Gambar 4. 12 Grafik Damping dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 30°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 30° diperoleh data sebanyak 28 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-80.

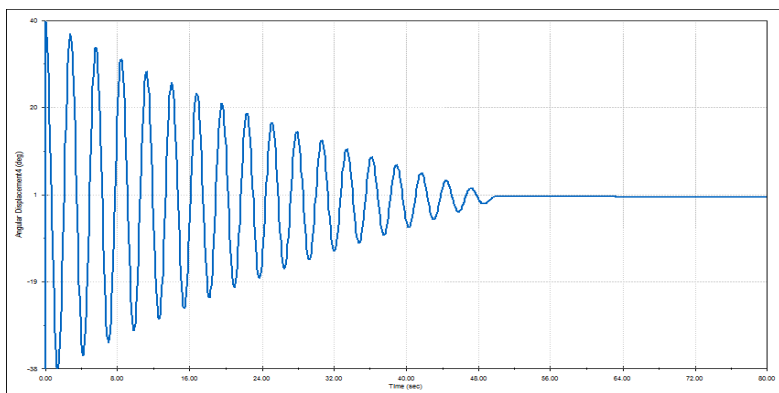


Gambar 4. 13 Grafik Damping dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 30°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 30° diperoleh data sebanyak 42 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-118.

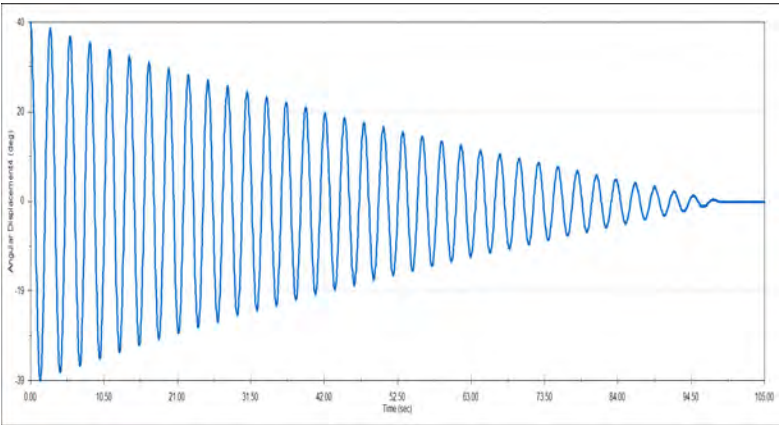
4.4.4 Perbandingan Analisa Damping Pendulum Vertikal dengan sudut 40°

Berikut perbandingan analisa pendulum vertikal yang telah di simulasikan dengan motion analysis. didapat masing – masing grafik dan juga banyak-nya simpangan yang terjadi pada tiap sudut 40° dengan massa pembebanan bandul sebesar 100 kg, 200 kg, dan 300 kg.



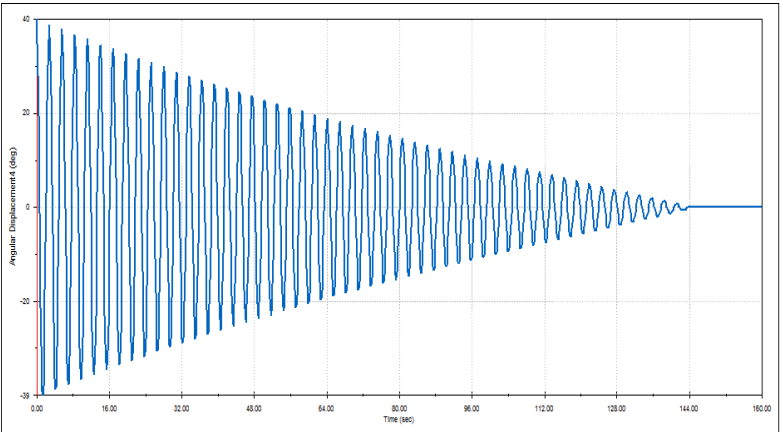
Gambar 4. 14 Grafik Damping dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 40°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 40° diperoleh data sebanyak 18 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-51.



Gambar 4. 15 Grafik Damping dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 40°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 40° diperoleh data sebanyak 35 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-100.

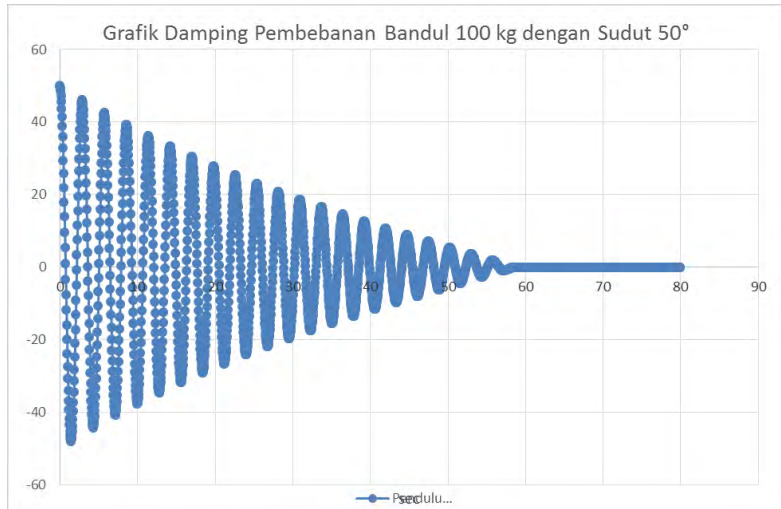


Gambar 4. 16 Grafik Damping dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 40°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 52° diperoleh data sebanyak 35 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-144

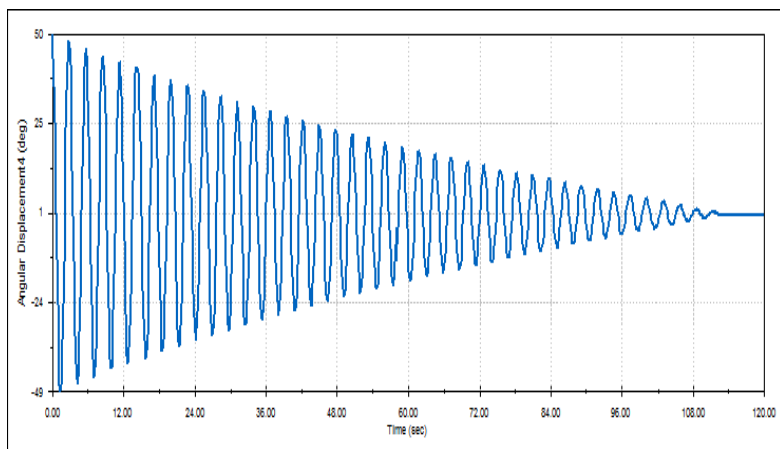
4.4.5 Perbandingan Analisa Damping Pendulum Vertikal dengan sudut 50°

Berikut perbandingan analisa pendulum vertikal yang telah di simulasikan dengan motion analysis. didapat masing – masing grafik dan juga banyak-nya simpangan yang terjadi pada tiap sudut 50° dengan massa pembebanan bandul sebesar 100 kg, 200 kg, dan 300 kg.



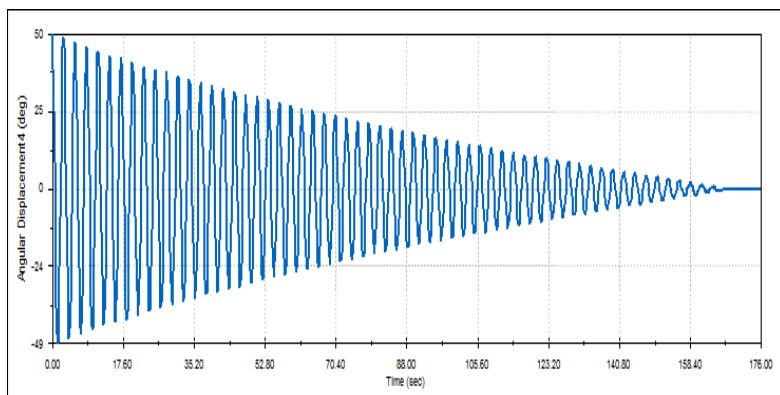
Gambar 4. 17 Grafik Damping dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 50°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 50° diperoleh data sebanyak 20 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-58.



Gambar 4. 18 Grafik Damping dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 50°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 50° diperoleh data sebanyak 40 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-112.

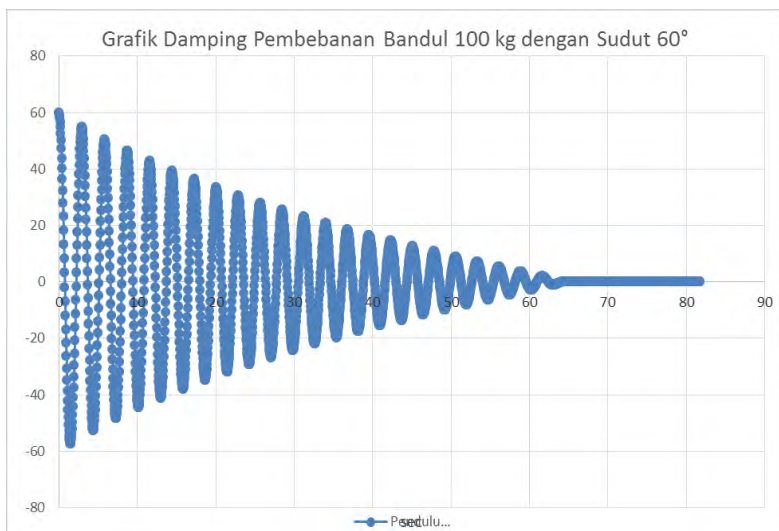


Gambar 4. 19 Grafik Damping dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 50°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 50° diperoleh data sebanyak 59 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-168.

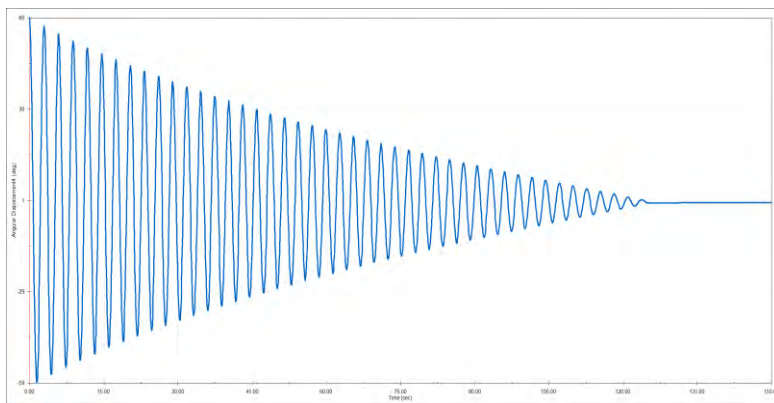
4.4.6 Perbandingan Analisa Damping Pendulum Vertikal dengan sudut 60°

Berikut perbandingan analisa pendulum vertikal yang telah di simulasikan dengan motion analysis. didapat masing – masing grafik dan juga banyak-nya simpangan yang terjadi pada tiap sudut 60° dengan massa pembebanan bandul sebesar 100 kg, 200 kg, dan 300 kg.



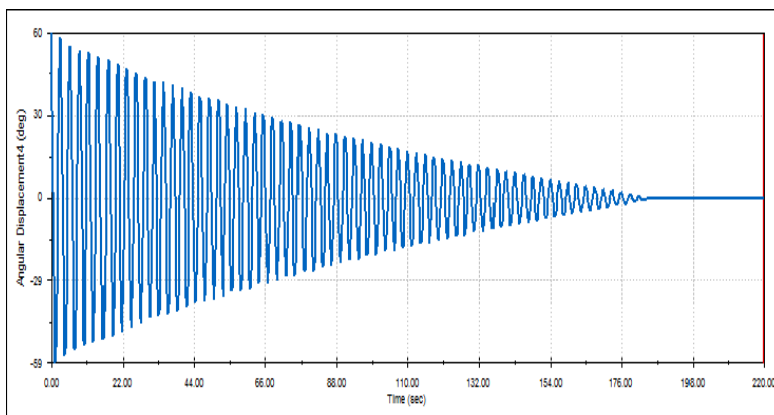
Gambar 4. 20 Grafik Damping dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 60°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 60° diperoleh data sebanyak 22 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-64.



Gambar 4. 21 Grafik Damping dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 60°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 60° diperoleh data sebanyak 44 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-124.

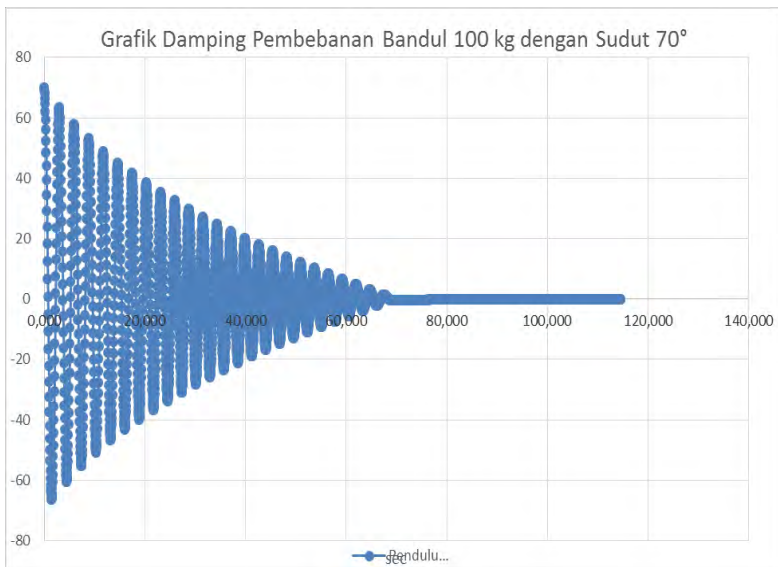


Gambar 4. 22 Grafik Damping dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 60°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 60° diperoleh data sebanyak 65 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-183.

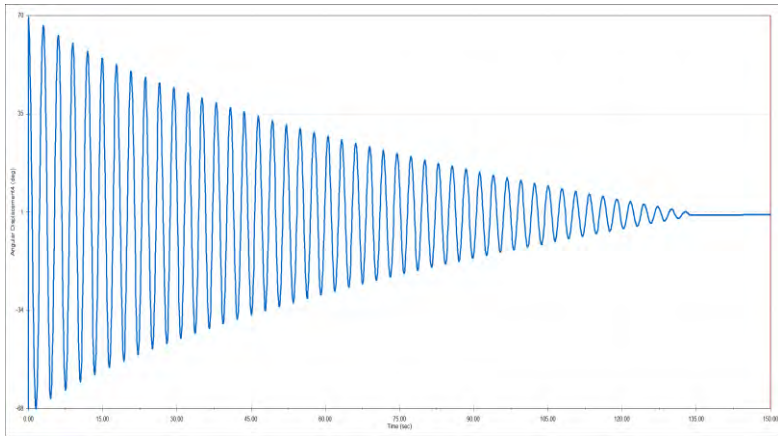
4.4.7 Perbandingan Analisa Damping Pendulum Vertikal dengan sudut 70°

Berikut perbandingan analisa pendulum vertikal yang telah di simulasikan dengan motion analysis. didapat masing – masing grafik dan juga banyak-nya simpangan yang terjadi pada tiap sudut 60° dengan massa pembebanan bandul sebesar 100 kg, 200 kg, dan 300 kg.



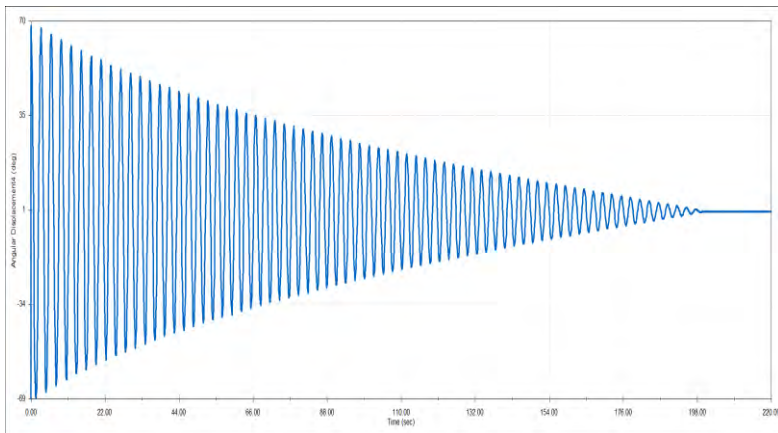
Gambar 4. 23 Grafik Damping dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 70°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 100 kg dan sudut 70° diperoleh data sebanyak 24 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-68.



Gambar 4. 24 Grafik Damping dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 70°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 200 kg dan sudut 70° diperoleh data sebanyak 48 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-134.



Gambar 4. 25 Grafik Damping dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 70°

Pada grafik damping diatas dengan beban pendulum 300 kg dan sudut 70° diperoleh data sebanyak 70 kali simpangan yang terjadi pada gerakan bandul dan berhenti pada detik ke-200.

4.5 Ringkasan Hasil Simulasi Pendulum Vertikal pada variasi Pembebanan dan tiap-tiap variasi sudut

Dari seluruh total 21 percobaan dengan menggunakan simulasi motion analysis, di-dapat perbandingan waktu dengan simpangan yang terjadi oleh pergerakan pendulum. Dengan hasil yang variasi pada tiap – tiap sudut yang direncanakan.

Tabel 4. 3 Hasil analisa motion analysis gerakan dari Pendulum vertikal

Sudut (°)	Jumlah Simpangan Pendulum			Time (Sec)		
	m ₁ (300kg)	m ₂ (200kg)	m ₃ (100kg)	m ₁ (300kg)	m ₂ (200kg)	m ₃ (100kg)
10	15	10	5	42	30	15
20	30	20	10	69	58	30
30	42	28	14	118	80	41
40	52	35	18	114	100	51
50	59	40	20	168	112	58
60	65	44	22	183	124	64
70	71	48	24	200	134	68

Tabel diatas menggambarkan besaran nilai jumlah simpangan yang didapat dan juga lama waktu berhenti sampai pada titik nol.

“ Halaman ini sengaja dikosongkan ”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

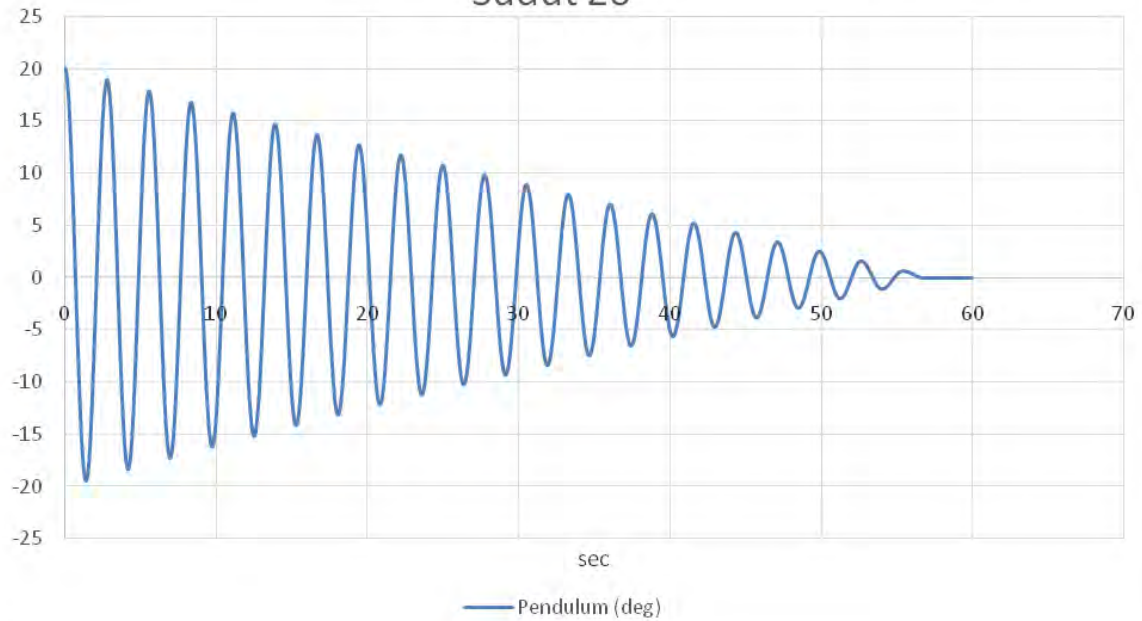
5.1 Kesimpulan

1. Sudut pendulum semakin besar akan memberikan variasi jumlah simpangan bandul yang semakin bertambah dan dapat berpengaruh pada energi yang di-transmisikan. Seperti percobaan simulasi pendulum pada sudut 70° dengan beban bandul sebesar 300kg menghasilkan simpangan sebanyak 71 kali .
2. Lama waktu yang dibutuhkan pendulum sampai berhenti di titik nol ditentukan oleh besar nya sudut pendulum dan pembebanan dari bandul. Seperti pada simulasi pendulum pada sudut 70° beban bandul sebesar 300kg, lama berhenti sampai di titik nol adalah pada detik ke-200 atau 3 menit 33 detik.
3. Semakin besar nilai sudut dan pembebanan yang ditumpu oleh bandul, maka akan semakin besar potensi ayunan simpangan pendulum yang terjadi. begitu juga sebaliknya apabila semakin kecil sudut dan pembebanan bandul yg diterima pendulum dari gerakan ponton, maka simpangan pendulum yg terjadi akan juga semakin kecil potensi ayunan atau simpangan pendulum yang terjadi. Seperti yang terjadi pada pendulum vertikal dengan sudut terkecil 10° dan beban bandul sebesar 100kg menghasilkan simpangan pendulum sebanyak 5 kali dan berhenti pada detik ke-15.

5.2 Saran

1. Untuk mendapatkan hasil yang lebih maksimal semua parameter mulai dari gerakan pendulum sampai dengan sistem transmisi perlu di simulasikan.
2. Dibandingkan dengan kondisi real dilapangan agar bisa di jadikan acuan pada eksperiment ataupun percobaan gerakan pendulum selanjutnya.
3. Diperlukan penelitian dengan metode yang lain untuk mendukung hasil yang didapat dari penelitian dengan pendekatan pengujian *gerakan pendulum vertikal* .

Grafik Damping Pembebanan Bandul 200 Kg dengan Sudut 20°



Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
1	0	20	19	0.72	-0.80491619	37	1.44	-19.32258435
2	0.04	19.91746845	20	0.76	-2.579276975	38	1.48	-19.05859768
3	0.08	19.67806617	21	0.8	-4.329908332	39	1.52	-18.64181094
4	0.12	19.28103641	22	0.84	-6.042363042	40	1.56	-18.07550899
5	0.16	18.72949193	23	0.88	-7.702649666	41	1.6	-17.36404283
6	0.2	18.02780318	24	0.92	-9.297146804	42	1.64	-16.51320723
7	0.24	17.18149201	25	0.96	-10.8128693	43	1.68	-15.5297683
8	0.28	16.19729061	26	1	-12.23755251	44	1.72	-14.42168279
9	0.32	15.08302111	27	1.04	-13.55942012	45	1.76	-13.19770732
10	0.36	13.847784	28	1.08	-14.76779322	46	1.8	-11.86750622
11	0.4	12.50163504	29	1.12	-15.85331728	47	1.84	-10.44198636
12	0.44	11.05537737	30	1.16	-16.8074355	48	1.88	-8.932927295
13	0.48	9.520527026	31	1.2	-17.62264245	49	1.92	-7.352661664
14	0.52	7.90970319	32	1.24	-18.29245896	50	1.96	-5.714139082
15	0.56	6.23612635	33	1.28	-18.8116528	51	2	-4.030819422
16	0.6	4.513567162	34	1.32	-19.17630842	52	2.04	-2.316622749
17	0.64	2.756209919	35	1.36	-19.38355164	53	2.08	-0.585793469
18	0.68	0.97849838	36	1.4	-19.43167899	54	2.12	1.147382022

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
55	2.16	2.868534608	73	2.88	18.4349344	91	3.6	-4.789970419
56	2.2	4.563389255	74	2.92	17.9975796	92	3.64	-6.386650669
57	2.24	6.218049219	75	2.96	17.41576768	93	3.68	-7.928343812
58	2.28	7.818982871	76	3	16.69414491	94	3.72	-9.402352866
59	2.32	9.353048693	77	3.04	15.83842327	95	3.76	-10.79677319
60	2.36	10.80789831	78	3.08	14.85535018	96	3.8	-12.10030825
61	2.4	12.17147817	79	3.12	13.75279898	97	3.84	-13.30242366
62	2.44	13.43304197	80	3.16	12.53978862	98	3.88	-14.39354456
63	2.48	14.58227211	81	3.2	11.22638264	99	3.92	-15.36485824
64	2.52	15.61015532	82	3.24	9.823326504	100	3.96	-16.20866559
65	2.56	16.50858851	83	3.28	8.341685671	101	4	-16.91837902
66	2.6	17.27047555	84	3.32	6.79360381	102	4.04	-17.48840399
67	2.64	17.88988767	85	3.36	5.191775975	103	4.08	-17.91424428
68	2.68	18.36197382	86	3.4	3.54937057	104	4.12	-18.19257513
69	2.72	18.68304139	87	3.44	1.880027719	105	4.16	-18.32117549
70	2.76	18.85050202	88	3.48	0.197500039	106	4.2	-18.29981769
71	2.8	18.86344186	89	3.52	-1.484223095	107	4.24	-18.13131909
72	2.84	18.72428997	90	3.56	-3.151307139	108	4.28	-17.817289

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
109	4.32	-17.36020552	127	5.04	6.55696113	145	5.76	16.09989629
110	4.36	-16.76373093	128	5.08	8.03985129	146	5.8	15.35832638
111	4.4	-16.03251099	129	5.12	9.454147687	147	5.84	14.49320775
112	4.44	-15.17245485	130	5.16	10.78827768	148	5.88	13.5115591
113	4.48	-14.19043729	131	5.2	12.03120977	149	5.92	12.42126402
114	4.52	-13.09441182	132	5.24	13.17335051	150	5.96	11.23116129
115	4.56	-11.89313936	133	5.28	14.20535454	151	6	9.95118025
116	4.6	-10.59615176	134	5.32	15.11905472	152	6.04	8.591732649
117	4.64	-9.213970791	135	5.36	15.90721202	153	6.08	7.163924784
118	4.68	-7.758149393	136	5.4	16.56366459	154	6.12	5.67919334
119	4.72	-6.240774034	137	5.44	17.08323158	155	6.16	4.149865157
120	4.76	-4.674267704	138	5.48	17.46176571	156	6.2	2.588565817
121	4.8	-3.071532741	139	5.52	17.6963465	157	6.24	1.008196667
122	4.84	-1.445826552	140	5.56	17.78498936	158	6.28	-0.57818197
123	4.88	0.189431695	141	5.6	17.72859517	159	6.32	-2.157426484
124	4.92	1.82073677	142	5.64	17.52972842	160	6.36	-3.716543133
125	4.96	3.434617831	143	5.68	17.18997393	161	6.4	-5.242645746
126	5	5.017660784	144	5.72	16.71207933	162	6.44	-6.723251603

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
163	6.48	-8.146128951	181	7.2	-14.69900751	199	7.92	9.537043772
164	6.52	-9.499761241	182	7.24	-13.83061705	200	7.96	10.7500647
165	6.56	-10.77299148	183	7.28	-12.85105013	201	8	11.87254988
166	6.6	-11.95564131	184	7.32	-11.76823892	202	8.04	12.89548446
167	6.64	-13.03812872	185	7.36	-10.59101592	203	8.08	13.81067121
168	6.68	-14.01180332	186	7.4	-9.328720624	204	8.12	14.61078936
169	6.72	-14.86887213	187	7.44	-7.99172477	205	8.16	15.2895056
170	6.76	-15.6024861	188	7.48	-6.590910942	206	8.2	15.84142184
171	6.8	-16.20695885	189	7.52	-5.137928927	207	8.24	16.26211907
172	6.84	-16.67742884	190	7.56	-3.644875476	208	8.28	16.54832343
173	6.88	-17.0101621	191	7.6	-2.123947855	209	8.32	16.69777505
174	6.92	-17.20250635	192	7.64	-0.587826744	210	8.36	16.70933654
175	6.96	-17.25294275	193	7.68	0.950814586	211	8.4	16.58581347
176	7	-17.16336418	194	7.72	2.479286744	212	8.44	16.32884868
177	7.04	-16.93588511	195	7.76	3.985025729	213	8.48	15.94049246
178	7.08	-16.57225962	196	7.8	5.455604572	214	8.52	15.42388934
179	7.12	-16.07542154	197	7.84	6.879012352	215	8.56	14.7832305
180	7.16	-15.4493303	198	7.88	8.243168408	216	8.6	14.02366445

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
217	8.64	13.15123777	235	9.36	-10.72716323	253	10.08	-11.50072533
218	8.68	12.17294739	236	9.4	-11.78847295	254	10.12	-10.43316558
219	8.72	11.09675704	237	9.44	-12.7509014	255	10.16	-9.281863871
220	8.76	9.931463638	238	9.48	-13.60678331	256	10.2	-8.056205458
221	8.8	8.68670506	239	9.52	-14.34934183	257	10.24	-6.766694828
222	8.84	7.372428953	240	9.56	-14.97259771	258	10.28	-5.424178714
223	8.88	5.999508211	241	9.6	-15.47163563	259	10.32	-4.039298439
224	8.92	4.579475756	242	9.64	-15.84249029	260	10.36	-2.623157795
225	8.96	3.123807839	243	9.68	-16.08225009	261	10.4	-1.187586425
226	9	1.644723425	244	9.72	-16.18895388	262	10.44	0.25542693
227	9.04	0.154271523	245	9.76	-16.16238736	263	10.48	1.694113199
228	9.08	-1.335074098	246	9.8	-16.00552236	264	10.52	3.116415391
229	9.12	-2.811166968	247	9.84	-15.71986489	265	10.56	4.510748797
230	9.16	-4.261802217	248	9.88	-15.30772371	266	10.6	5.865821191
231	9.2	-5.675188291	249	9.92	-14.77243192	267	10.64	7.170396024
232	9.24	-7.039460224	250	9.96	-14.11838114	268	10.68	8.413782216
233	9.28	-8.343199568	251	10	-13.35081662	269	10.72	9.585956044
234	9.32	-9.575674954	252	10.04	-12.47589182	270	10.76	10.67720746

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
271	10.8	11.67865955	289	11.52	9.774237842	307	12.24	-12.41394571
272	10.84	12.58219703	290	11.56	8.637947745	308	12.28	-13.15369661
273	10.88	13.38060811	291	11.6	7.4326931	309	12.32	-13.78394462
274	10.92	14.06742698	292	11.64	6.168267553	310	12.36	-14.29957392
275	10.96	14.637058	293	11.68	4.85500025	311	12.4	-14.69638808
276	11	15.08509474	294	11.72	3.503755855	312	12.44	-14.97121528
277	11.04	15.40795541	295	11.76	2.125772937	313	12.48	-15.12190547
278	11.08	15.60308642	296	11.8	0.732579897	314	12.52	-15.14758669
279	11.12	15.66893753	297	11.84	-0.664453714	315	12.56	-15.05062356
280	11.16	15.60639813	298	11.88	-2.053859171	316	12.6	-14.83245208
281	11.2	15.41802637	299	11.92	-3.42414928	317	12.64	-14.49489606
282	11.24	15.10555989	300	11.96	-4.763741123	318	12.68	-14.04064508
283	11.28	14.67147432	301	12	-6.061476706	319	12.72	-13.4733748
284	11.32	14.11924352	302	12.04	-7.306677914	320	12.76	-12.79774208
285	11.36	13.45342617	303	12.08	-8.489432519	321	12.8	-12.01922617
286	11.4	12.67932785	304	12.12	-9.600262744	322	12.84	-11.14412303
287	11.44	11.80318036	305	12.16	-10.63004217	323	12.88	-10.17955653
288	11.48	10.8321819	306	12.2	-11.57048086	324	12.92	-9.133350885

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
325	12.96	-8.014005616	343	13.68	12.8965127	361	14.4	6.224971636
326	13	-6.830832968	344	13.72	13.47234547	362	14.44	5.015447071
327	13.04	-5.593476836	345	13.76	13.93603334	363	14.48	3.766914931
328	13.08	-4.312175171	346	13.8	14.28375171	364	14.52	2.489617763
329	13.12	-2.997468225	347	13.84	14.51272124	365	14.56	1.193742849
330	13.16	-1.660039012	348	13.88	14.62111892	366	14.6	-0.110032801
331	13.2	-0.310822423	349	13.92	14.60895443	367	14.64	-1.410937108
332	13.24	1.038578011	350	13.96	14.47881325	368	14.68	-2.698239901
333	13.28	2.376637042	351	14	14.23207465	369	14.72	-3.961241822
334	13.32	3.692640131	352	14.04	13.87071312	370	14.76	-5.189418949
335	13.36	4.97595675	353	14.08	13.39758663	371	14.8	-6.372799194
336	13.4	6.215827778	354	14.12	12.81652558	372	14.84	-7.50144816
337	13.44	7.40209773	355	14.16	12.13234568	373	14.88	-8.566182519
338	13.48	8.525267032	356	14.2	11.35056963	374	14.92	-9.558299932
339	13.52	9.576096087	357	14.24	10.47750577	375	14.96	-10.46979746
340	13.56	10.5461329	358	14.28	9.5202321	376	15	-11.29325947
341	13.6	11.42750832	359	14.32	8.486639348	377	15.04	-12.02202555
342	13.64	12.2130753	360	14.36	7.385185175	378	15.08	-12.65026533

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
379	15.12	-13.17296704	397	15.84	-4.464315255	415	16.56	13.20497634
380	15.16	-13.58589602	398	15.88	-3.248419562	416	16.6	13.45718306
381	15.2	-13.885673	399	15.92	-2.007827835	417	16.64	13.59731428
382	15.24	-14.06996035	400	15.96	-0.752677993	418	16.68	13.62455352
383	15.28	-14.13730151	401	16	0.50650039	419	16.72	13.5413656
384	15.32	-14.08861255	402	16.04	1.759490659	420	16.76	13.34906657
385	15.36	-13.92625469	403	16.08	2.995926537	421	16.8	13.04923309
386	15.4	-13.6517562	404	16.12	4.205087875	422	16.84	12.64427289
387	15.44	-13.26740381	405	16.16	5.377315718	423	16.88	12.13743704
388	15.48	-12.77617014	406	16.2	6.5030895	424	16.92	11.5329078
389	15.52	-12.18214691	407	16.24	7.572979852	425	16.96	10.8356262
390	15.56	-11.49016556	408	16.28	8.578367368	426	17	10.05119616
391	15.6	-10.70579736	409	16.32	9.51105572	427	17.04	9.185994212
392	15.64	-9.835371962	410	16.36	10.36346232	428	17.08	8.247174549
393	15.68	-8.886030037	411	16.4	11.12870882	429	17.12	7.242489322
394	15.72	-7.865530926	412	16.44	11.80045398	430	17.16	6.180200372
395	15.76	-6.782442579	413	16.48	12.37327274	431	17.2	5.068990954
396	15.8	-5.645668999	414	16.52	12.84269579	432	17.24	3.918037587

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
433	17.28	2.736758696	451	18	-13.02809207	469	18.72	-1.087160119
434	17.32	1.535054476	452	18.04	-13.12652593	470	18.76	0.081899928
435	17.36	0.322727677	453	18.08	-13.11642349	471	18.8	1.247888383
436	17.4	-0.890318138	454	18.12	-13.00028931	472	18.84	2.401485072
437	17.44	-2.093855697	455	18.16	-12.77941452	473	18.88	3.533109212
438	17.48	-3.277932361	456	18.2	-12.45562995	474	18.92	4.633449822
439	17.52	-4.432908221	457	18.24	-12.03153539	475	18.96	5.693475579
440	17.56	-5.549118793	458	18.28	-11.51058387	476	19	6.704474307
441	17.6	-6.6175138	459	18.32	-10.89707561	477	19.04	7.658123016
442	17.64	-7.629315761	460	18.36	-10.19594456	478	19.08	8.546641593
443	17.68	-8.576179788	461	18.4	-9.412970691	479	19.12	9.362792516
444	17.72	-9.450403235	462	18.44	-8.554505868	480	19.16	10.09996521
445	17.76	-10.24487986	463	18.48	-7.627573447	481	19.2	10.7522725
446	17.8	-10.95317742	464	18.52	-6.639858709	482	19.24	11.31442776
447	17.84	-11.56950272	465	18.56	-5.599447405	483	19.28	11.7817376
448	17.88	-12.08890215	466	18.6	-4.514838923	484	19.32	12.15043715
449	17.92	-12.50722002	467	18.64	-3.395058335	485	19.36	12.41754716
450	17.96	-12.82112751	468	18.68	-2.249316743	486	19.4	12.58093958

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
487	19.44	12.63926809	505	20.16	-0.472629155	523	20.88	-12.07316322
488	19.48	12.59355893	506	20.2	-1.591369813	524	20.92	-11.89733652
489	19.52	12.44623733	507	20.24	-2.694927959	525	20.96	-11.62580417
490	19.56	12.19864889	508	20.28	-3.77423027	526	21	-11.26068317
491	19.6	11.85281053	509	20.32	-4.820357888	527	21.04	-10.80492913
492	19.64	11.41149741	510	20.36	-5.824744435	528	21.08	-10.26226739
493	19.68	10.8783234	511	20.4	-6.779092614	529	21.12	-9.636972902
494	19.72	10.25765222	512	20.44	-7.675567068	530	21.16	-8.93411716
495	19.76	9.554574974	513	20.48	-8.506825546	531	21.2	-8.159605534
496	19.8	8.774835238	514	20.52	-9.266080989	532	21.24	-7.319822683
497	19.84	7.924812509	515	20.56	-9.947130601	533	21.28	-6.421710597
498	19.88	7.011465932	516	20.6	-10.54441486	534	21.32	-5.472621142
499	19.92	6.042364573	517	20.64	-11.05319091	535	21.36	-4.480330269
500	19.96	5.025497575	518	20.68	-11.46933156	536	21.4	-3.453099163
501	20	3.969164033	519	20.72	-11.78944115	537	21.44	-2.39947712
502	20.04	2.88215143	520	20.76	-12.01085092	538	21.48	-1.328075137
503	20.08	1.773394039	521	20.8	-12.13185031	539	21.52	-0.247781583
504	20.12	0.652076087	522	20.84	-12.15177551	540	21.56	0.832399931

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
541	21.6	1.903576961	559	22.32	11.33769744	577	23.04	-3.204568805
542	21.64	2.956953219	560	22.36	11.04353417	578	23.08	-4.178936103
543	21.68	3.983843438	561	22.4	10.66038704	579	23.12	-5.116831316
544	21.72	4.975717126	562	22.44	10.19142234	580	23.16	-6.010515659
545	21.76	5.924475458	563	22.48	9.640493872	581	23.2	-6.852685747
546	21.8	6.822368968	564	22.52	9.011990971	582	23.24	-7.636399865
547	21.84	7.662060232	565	22.56	8.311021644	583	23.28	-8.35522934
548	21.88	8.436619165	566	22.6	7.543488359	584	23.32	-9.003139115
549	21.92	9.139819813	567	22.64	6.71571677	585	23.36	-9.574868327
550	21.96	9.765886167	568	22.68	5.834536058	586	23.4	-10.06592502
551	22	10.30981688	569	22.72	4.907154608	587	23.44	-10.47236145
552	22.04	10.76711107	570	22.76	3.941268058	588	23.48	-10.79087361
553	22.08	11.13408957	571	22.8	2.944876031	589	23.52	-11.01883184
554	22.12	11.40773107	572	22.84	1.926232254	590	23.56	-11.15440018
555	22.16	11.58572761	573	22.88	0.893656759	591	23.6	-11.19664547
556	22.2	11.66666423	574	22.92	-0.144271113	592	23.64	-11.14744556
557	22.24	11.65070419	575	22.96	-1.178957119	593	23.68	-11.00844693
558	22.28	11.54061929	576	23	-2.201849824	594	23.72	-10.78091259

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
595	23.76	-10.46660449	613	24.48	4.331343838	631	25.2	9.46435011
596	23.8	-10.06805714	614	24.52	5.214632269	632	25.24	8.977067595
597	23.84	-9.588573385	615	24.56	6.052954444	633	25.28	8.417740401
598	23.88	-9.032049176	616	24.6	6.839310669	634	25.32	7.791039705
599	23.92	-8.403165854	617	24.64	7.567274175	635	25.36	7.102145972
600	23.96	-7.707168468	618	24.68	8.230776598	636	25.4	6.356699426
601	24	-6.949571743	619	24.72	8.824417784	637	25.44	5.560759929
602	24.04	-6.136618501	620	24.76	9.343460828	638	25.48	4.720866701
603	24.08	-5.274985648	621	24.8	9.783730961	639	25.52	3.843959025
604	24.12	-4.371895953	622	24.84	10.14168446	640	25.56	2.937298751
605	24.16	-3.43477376	623	24.88	10.41441472	641	25.6	2.008373042
606	24.2	-2.471291769	624	24.92	10.59964224	642	25.64	1.064791338
607	24.24	-1.489376326	625	24.96	10.69591839	643	25.68	0.114437243
608	24.28	-0.497167561	626	25	10.70276367	644	25.72	-0.834884552
609	24.32	0.497098116	627	25.04	10.62268982	645	25.76	-1.775367764
610	24.36	1.485214786	628	25.08	10.45711566	646	25.8	-2.699192649
611	24.4	2.459014577	629	25.12	10.20743575	647	25.84	-3.598794439
612	24.44	3.410320711	630	25.16	9.875608901	648	25.88	-4.466726934

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
649	25.92	-5.295816285	667	26.64	-8.388414443	685	27.36	6.074488444
650	25.96	-6.079276145	668	26.68	-7.829067177	686	27.4	6.752141641
651	26	-6.810655923	669	26.72	-7.20692611	687	27.44	7.372019792
652	26.04	-7.484020472	670	26.76	-6.527147518	688	27.48	7.929155325
653	26.08	-8.093804661	671	26.8	-5.795314056	689	27.52	8.419107108
654	26.12	-8.635045246	672	26.84	-5.017621613	690	27.56	8.837804079
655	26.16	-9.103297828	673	26.88	-4.200471505	691	27.6	9.181871236
656	26.2	-9.494732886	674	26.92	-3.350633183	692	27.64	9.448543368
657	26.24	-9.806153818	675	26.96	-2.475084226	693	27.68	9.63555456
658	26.28	-10.03502961	676	27	-1.581075558	694	27.72	9.741453529
659	26.32	-10.17949305	677	27.04	-0.676028657	695	27.76	9.765470095
660	26.36	-10.23844574	678	27.08	0.232586076	696	27.8	9.709529332
661	26.4	-10.21298048	679	27.12	1.13727475	697	27.84	9.575481335
662	26.44	-10.10525227	680	27.16	2.030514853	698	27.88	9.364554982
663	26.48	-9.916282599	681	27.2	2.904967101	699	27.92	9.078398221
664	26.52	-9.647631676	682	27.24	3.753435875	700	27.96	8.719304864
665	26.56	-9.301445832	683	27.28	4.568905114	701	28	8.290275764
666	26.6	-8.880561027	684	27.32	5.344685839	702	28.04	7.794784993

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
703	28.08	7.236947661	721	28.8	-6.67023891	739	29.52	-6.062295874
704	28.12	6.621368622	722	28.84	-7.238023661	740	29.56	-5.407744828
705	28.16	5.953278952	723	28.88	-7.74423796	741	29.6	-4.710293959
706	28.2	5.238032872	724	28.92	-8.184757927	742	29.64	-3.975830124
707	28.24	4.481414549	725	28.96	-8.555970935	743	29.68	-3.210527487
708	28.28	3.689720195	726	29	-8.854867858	744	29.72	-2.420692792
709	28.32	2.869529133	727	29.04	-9.078984312	745	29.76	-1.61282703
710	28.36	2.027559385	728	29.08	-9.226454168	746	29.8	-0.793611368
711	28.4	1.170756746	729	29.12	-9.296105242	747	29.84	0.030158584
712	28.44	0.306208075	730	29.16	-9.288091404	748	29.88	0.851668882
713	28.48	-0.558945222	731	29.2	-9.205226565	749	29.92	1.664154212
714	28.52	-1.417522508	732	29.24	-9.048502462	750	29.96	2.460939541
715	28.56	-2.262415051	733	29.28	-8.819225539	751	30	3.235446907
716	28.6	-3.086701768	734	29.32	-8.519168577	752	30.04	3.981303053
717	28.64	-3.883580105	735	29.36	-8.150797014	753	30.08	4.692325789
718	28.68	-4.646450236	736	29.4	-7.717124707	754	30.12	5.36291463
719	28.72	-5.369110328	737	29.44	-7.221677171	755	30.16	5.987615152
720	28.76	-6.04557863	738	29.48	-6.668590169	756	30.2	6.561072071

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
757	30.24	7.078460451	775	30.96	4.885160849	793	31.68	-7.299413663
758	30.28	7.535634721	776	31	4.208741776	794	31.72	-7.647752141
759	30.32	7.928812609	777	31.04	3.499564001	795	31.76	-7.931215945
760	30.36	8.25479812	778	31.08	2.763393261	796	31.8	-8.147462125
761	30.4	8.510955109	779	31.12	2.006299315	797	31.84	-8.294703361
762	30.44	8.695093895	780	31.16	1.234514121	798	31.88	-8.37165239
763	30.48	8.805717161	781	31.2	0.454431001	799	31.92	-8.377756603
764	30.52	8.841970736	782	31.24	-0.327495466	800	31.96	-8.316162886
765	30.56	8.805895287	783	31.28	-1.104791761	801	32	-8.187994017
766	30.6	8.69914616	784	31.32	-1.871037995	802	32.04	-7.994229401
767	30.64	8.522677605	785	31.36	-2.619939126	803	32.08	-7.736435524
768	30.68	8.277930899	786	31.4	-3.345264183	804	32.12	-7.416668747
769	30.72	7.966803998	787	31.44	-4.041109567	805	32.16	-7.03758674
770	30.76	7.591867509	788	31.48	-4.701773991	806	32.2	-6.602352089
771	30.8	7.156249595	789	31.52	-5.321817689	807	32.24	-6.114532906
772	30.84	6.663485506	790	31.56	-5.896178936	808	32.28	-5.578143677
773	30.88	6.1176295	791	31.6	-6.420018517	809	32.32	-4.997589371
774	30.92	5.523220115	792	31.64	-6.889052862	810	32.36	-4.377756797

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
811	32.4	-3.723710865	829	33.12	7.342695205	847	33.84	2.612074874
812	32.44	-3.040884979	830	33.16	7.584824929	848	33.88	1.938709026
813	32.48	-2.335007987	831	33.2	7.76250804	849	33.92	1.251256259
814	32.52	-1.611806409	832	33.24	7.874397931	850	33.96	0.555461316
815	32.56	-0.877238737	833	33.28	7.919367754	851	34	-0.143101493
816	32.6	-0.137385016	834	33.32	7.898797835	852	34.04	-0.838641798
817	32.64	0.601583635	835	33.36	7.8150943	853	34.08	-1.52529541
818	32.68	1.333628014	836	33.4	7.668834038	854	34.12	-2.197323748
819	32.72	2.052667284	837	33.44	7.461314121	855	34.16	-2.849297723
820	32.76	2.752787844	838	33.48	7.19414188	856	34.2	-3.475827475
821	32.8	3.428453415	839	33.52	6.869484612	857	34.24	-4.071665223
822	32.84	4.073975655	840	33.56	6.49006846	858	34.28	-4.631971129
823	32.88	4.683999198	841	33.6	6.058982759	859	34.32	-5.152141221
824	32.92	5.253513579	842	33.64	5.57976406	860	34.36	-5.62793746
825	32.96	5.777802964	843	33.68	5.056336019	861	34.4	-6.055476495
826	33	6.252547555	844	33.72	4.49300921	862	34.44	-6.431224177
827	33.04	6.673837866	845	33.76	3.894487797	863	34.48	-6.752055549
828	33.08	7.038202781	846	33.8	3.265784851	864	34.52	-7.015356003

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
865	34.56	-7.218926266	883	35.28	-1.562639727	901	36	6.932959412
866	34.6	-7.361091835	884	35.32	-0.912570244	902	36.04	6.982318753
867	34.64	-7.44062431	885	35.36	-0.257081116	903	36.08	6.972936444
868	34.68	-7.456976142	886	35.4	0.398380348	904	36.12	6.907861219
869	34.72	-7.412424104	887	35.44	1.04835622	905	36.16	6.787809478
870	34.76	-7.308783189	888	35.48	1.687530163	906	36.2	6.613636987
871	34.8	-7.146786292	889	35.52	2.310693296	907	36.24	6.386820312
872	34.84	-6.927759255	890	35.56	2.912850398	908	36.28	6.109145395
873	34.88	-6.653441045	891	35.6	3.489157033	909	36.32	5.782937146
874	34.92	-6.326082324	892	35.64	4.034683423	910	36.36	5.410878894
875	34.96	-5.948410855	893	35.68	4.544998302	911	36.4	4.995964623
876	35	-5.523481649	894	35.72	5.015931195	912	36.44	4.541664347
877	35.04	-5.054823218	895	35.76	5.44362998	913	36.48	4.051713
878	35.08	-4.546286477	896	35.8	5.824586843	914	36.52	3.530229886
879	35.12	-4.00211248	897	35.84	6.155635908	915	36.56	2.981499231
880	35.16	-3.426840218	898	35.88	6.43407871	916	36.6	2.409978501
881	35.2	-2.825081959	899	35.92	6.657617035	917	36.64	1.820463712
882	35.24	-2.201916011	900	35.96	6.824353045	918	36.68	1.21766138

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
919	36.72	0.606677261	937	37.44	-6.534794707	955	38.16	0.229884195
920	36.76	-0.007356204	938	37.48	-6.504271347	956	38.2	0.798590368
921	36.8	-0.619422932	939	37.52	-6.421959766	957	38.24	1.358840732
922	36.84	-1.224632221	940	37.56	-6.288670787	958	38.28	1.905954807
923	36.88	-1.817868703	941	37.6	-6.105372777	959	38.32	2.435421226
924	36.92	-2.394176485	942	37.64	-5.87352993	960	38.36	2.942831696
925	36.96	-2.948880801	943	37.68	-5.595008047	961	38.4	3.424031929
926	37	-3.477333615	944	37.72	-5.272196656	962	38.44	3.875030465
927	37.04	-3.975208395	945	37.76	-4.907777493	963	38.48	4.292101518
928	37.08	-4.438411427	946	37.8	-4.504675361	964	38.52	4.67189649
929	37.12	-4.863100739	947	37.84	-4.066333186	965	38.56	5.011277532
930	37.16	-5.245848182	948	37.88	-3.596351703	966	38.6	5.307490571
931	37.2	-5.583484524	949	37.92	-3.098575343	967	38.64	5.558122404
932	37.24	-5.873260725	950	37.96	-2.577141566	968	38.68	5.761048207
933	37.28	-6.112803857	951	38	-2.036297565	969	38.72	5.914562005
934	37.32	-6.300084381	952	38.04	-1.480557829	970	38.76	6.017334808
935	37.36	-6.433482064	953	38.08	-0.91446035	971	38.8	6.068522307
936	37.4	-6.511894922	954	38.12	-0.342768077	972	38.84	6.068493881

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
973	38.88	6.019980251	991	39.6	-0.9498178	1009	40.32	-5.436831581
974	38.92	5.923785154	992	39.64	-1.465402216	1010	40.36	-5.285787055
975	38.96	5.780627805	993	39.68	-1.967009689	1011	40.4	-5.09292993
976	39	5.591636016	994	39.72	-2.450528267	1012	40.44	-4.859858237
977	39.04	5.358314557	995	39.76	-2.911972467	1013	40.48	-4.588476432
978	39.08	5.082561113	996	39.8	-3.347570743	1014	40.52	-4.2810787
979	39.12	4.766646686	997	39.84	-3.753683469	1015	40.56	-3.94020528
980	39.16	4.413150891	998	39.88	-4.126986104	1016	40.6	-3.568636096
981	39.2	4.025046555	999	39.92	-4.464330005	1017	40.64	-3.169461181
982	39.24	3.605605405	1000	39.96	-4.762914016	1018	40.68	-2.745938179
983	39.28	3.158245906	1001	40	-5.020403177	1019	40.72	-2.301603184
984	39.32	2.686644506	1002	40.04	-5.234656065	1020	40.76	-1.840107608
985	39.36	2.194647422	1003	40.08	-5.403888563	1021	40.8	-1.365308189
986	39.4	1.68635658	1004	40.12	-5.526574443	1022	40.84	-0.881134134
987	39.44	1.16594664	1005	40.16	-5.601849115	1023	40.88	-0.391688531
988	39.48	0.637749273	1006	40.2	-5.628912864	1024	40.92	0.099084345
989	39.52	0.106107999	1007	40.24	-5.609183904	1025	40.96	0.587137116
990	39.56	-0.424547945	1008	40.28	-5.544969981	1026	41	1.068466604

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
1027	41.04	1.539071005	1045	41.76	4.788111107	1063	42.48	-1.990476309
1028	41.08	1.995119298	1046	41.8	4.595266914	1064	42.52	-2.383603556
1029	41.12	2.432818616	1047	41.84	4.366262233	1065	42.56	-2.755230132
1030	41.16	2.848569192	1048	41.88	4.103027923	1066	42.6	-3.10226213
1031	41.2	3.238927163	1049	41.92	3.807770669	1067	42.64	-3.421863991
1032	41.24	3.600661809	1050	41.96	3.482930559	1068	42.68	-3.711343394
1033	41.28	3.93076517	1051	42	3.131146365	1069	42.72	-3.968366625
1034	41.32	4.226497723	1052	42.04	2.755320795	1070	42.76	-4.190813855
1035	41.36	4.485480433	1053	42.08	2.358521272	1071	42.8	-4.376778506
1036	41.4	4.705645812	1054	42.12	1.944050042	1072	42.84	-4.52462663
1037	41.44	4.885123437	1055	42.16	1.515336287	1073	42.88	-4.633230091
1038	41.48	5.022391959	1056	42.2	1.07594603	1074	42.92	-4.701815873
1039	41.52	5.116328559	1057	42.24	0.629525445	1075	42.96	-4.729619652
1040	41.56	5.166195495	1058	42.28	0.179708508	1076	43	-4.718020645
1041	41.6	5.171810129	1059	42.32	-0.26976595	1077	43.04	-4.669360347
1042	41.64	5.135937432	1060	42.36	-0.715156492	1078	43.08	-4.584024167
1043	41.68	5.059537974	1061	42.4	-1.15279062	1079	43.12	-4.462710703
1044	41.72	4.94327625	1062	42.44	-1.579094259	1080	43.16	-4.306572658

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
1081	43.2	-4.116747315	1099	43.92	2.292623069	1117	44.64	3.428143717
1082	43.24	-3.894806185	1100	43.96	2.621145659	1118	44.68	3.190010257
1083	43.28	-3.642543427	1101	44	2.926111913	1119	44.72	2.927350739
1084	43.32	-3.362072097	1102	44.04	3.205009969	1120	44.76	2.642337321
1085	43.36	-3.055671258	1103	44.08	3.455587137	1121	44.8	2.337250153
1086	43.4	-2.725836594	1104	44.12	3.675775594	1122	44.84	2.014614489
1087	43.44	-2.375329117	1105	44.16	3.863658382	1123	44.88	1.677101014
1088	43.48	-2.007031065	1106	44.2	4.017648817	1124	44.92	1.327460279
1089	43.52	-1.624021662	1107	44.24	4.136530595	1125	44.96	0.968701839
1090	43.56	-1.22950163	1108	44.28	4.21943282	1126	45	0.603776176
1091	43.6	-0.826691928	1109	44.32	4.265561645	1127	45.04	0.2356563
1092	43.64	-0.418955572	1110	44.36	4.274569001	1128	45.08	-0.132556034
1093	43.68	-0.009644244	1111	44.4	4.249443411	1129	45.12	-0.497842732
1094	43.72	0.397846562	1112	44.44	4.191188684	1130	45.16	-0.857170429
1095	43.76	0.800157295	1113	44.48	4.100165335	1131	45.2	-1.207583016
1096	43.8	1.193986374	1114	44.52	3.977169098	1132	45.24	-1.546147166
1097	43.84	1.576072989	1115	44.56	3.823317157	1133	45.28	-1.8700317
1098	43.88	1.943305552	1116	44.6	3.639822687	1134	45.32	-2.176622299

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
1135	45.36	-2.463434272	1153	46.08	-2.763367111	1171	46.8	2.496236414
1136	45.4	-2.728074641	1154	46.12	-2.520269053	1172	46.84	2.699608821
1137	45.44	-2.968376528	1155	46.16	-2.258210184	1173	46.88	2.87880066
1138	45.48	-3.182387394	1156	46.2	-1.979324284	1174	46.92	3.032359049
1139	45.52	-3.368338992	1157	46.24	-1.685929042	1175	46.96	3.158917553
1140	45.56	-3.524619858	1158	46.28	-1.380627622	1176	47	3.257576408
1141	45.6	-3.649917585	1159	46.32	-1.065826769	1177	47.04	3.327498729
1142	45.64	-3.743287375	1160	46.36	-0.744111765	1178	47.08	3.367814038
1143	45.68	-3.803825899	1161	46.4	-0.418140828	1179	47.12	3.378015945
1144	45.72	-3.830715077	1162	46.44	-0.090557413	1180	47.16	3.36096103
1145	45.76	-3.824629235	1163	46.48	0.235928796	1181	47.2	3.318383943
1146	45.8	-3.788951799	1164	46.52	0.558586894	1182	47.24	3.250326834
1147	45.84	-3.724085996	1165	46.56	0.874808792	1183	47.28	3.15721225
1148	45.88	-3.630372715	1166	46.6	1.181959944	1184	47.32	3.039869724
1149	45.92	-3.508489066	1167	46.64	1.477470159	1185	47.36	2.8993673
1150	45.96	-3.359611	1168	46.68	1.758943714	1186	47.4	2.736701725
1151	46	-3.184786958	1169	46.72	2.024013973	1187	47.44	2.553231206
1152	46.04	-2.985497577	1170	46.76	2.270424246	1188	47.48	2.350443763

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
1189	47.52	2.130039959	1207	48.24	-2.41339176	1225	48.96	-1.569299872
1190	47.56	1.89390126	1208	48.28	-2.560426969	1226	49	-1.350385853
1191	47.6	1.643917352	1209	48.32	-2.684433058	1227	49.04	-1.122175324
1192	47.64	1.38213127	1210	48.36	-2.784481385	1228	49.08	-0.886528221
1193	47.68	1.110747846	1211	48.4	-2.859596314	1229	49.12	-0.64545771
1194	47.72	0.832043881	1212	48.44	-2.909129933	1230	49.16	-0.400976251
1195	47.76	0.548277452	1213	48.48	-2.932697385	1231	49.2	-0.155026542
1196	47.8	0.261773313	1214	48.52	-2.930855308	1232	49.24	0.090355332
1197	47.84	-0.025033283	1215	48.56	-2.906580247	1233	49.28	0.333086746
1198	47.88	-0.309843403	1216	48.6	-2.860305543	1234	49.32	0.57117903
1199	47.92	-0.590237309	1217	48.64	-2.792494837	1235	49.36	0.802732104
1200	47.96	-0.863902673	1218	48.68	-2.703567447	1236	49.4	1.025815783
1201	48	-1.128614273	1219	48.72	-2.594147238	1237	49.44	1.238453112
1202	48.04	-1.382177884	1220	48.76	-2.465207675	1238	49.48	1.438972427
1203	48.08	-1.622490951	1221	48.8	-2.317795242	1239	49.52	1.625767465
1204	48.12	-1.847505029	1222	48.84	-2.153034376	1240	49.56	1.797310826
1205	48.16	-2.055424821	1223	48.88	-1.972350093	1241	49.6	1.952189586
1206	48.2	-2.244564258	1224	48.92	-1.777199442	1242	49.64	2.089049376

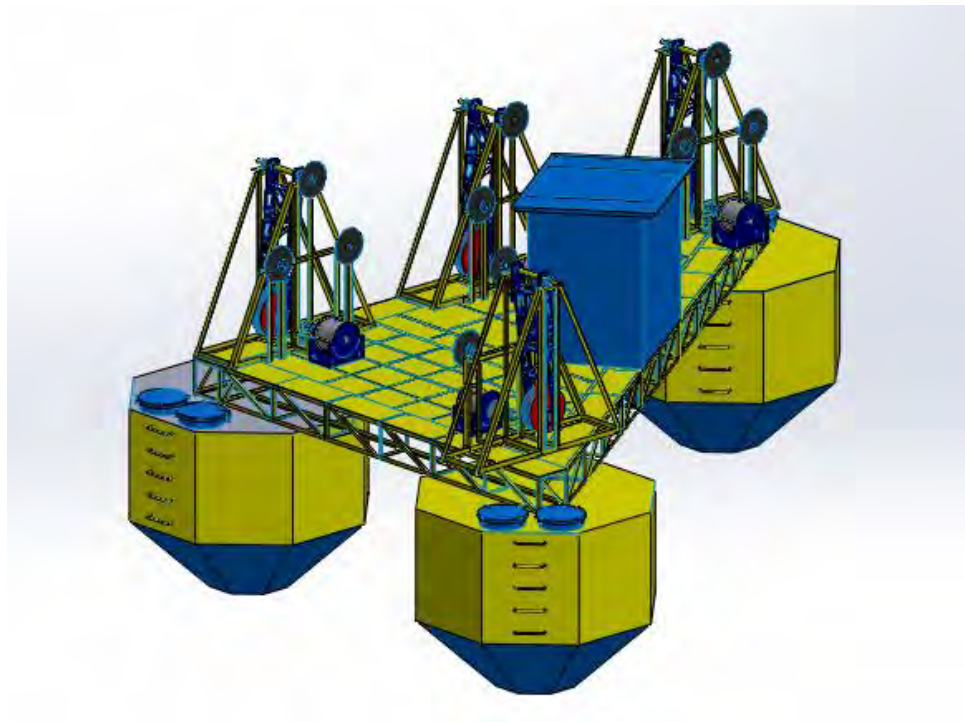
Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
1243	49.68	2.206703953	1261	50.4	1.082644833	1279	51.12	-1.913424967
1244	49.72	2.304331981	1262	50.44	0.88988051	1280	51.16	-1.969680419
1245	49.76	2.38103236	1263	50.48	0.691566718	1281	51.2	-2.007831261
1246	49.8	2.435996675	1264	50.52	0.489330313	1282	51.24	-2.027265494
1247	49.84	2.468820048	1265	50.56	0.284876592	1283	51.28	-2.02807985
1248	49.88	2.479112142	1266	50.6	0.07991955	1284	51.32	-2.013680729
1249	49.92	2.469410806	1267	50.64	-0.123864875	1285	51.36	-1.984988674
1250	49.96	2.441495579	1268	50.68	-0.324817315	1286	51.4	-1.941823308
1251	50	2.395503687	1269	50.72	-0.521253244	1287	51.44	-1.884530742
1252	50.04	2.331846877	1270	50.76	-0.71151059	1288	51.48	-1.813778112
1253	50.08	2.250812181	1271	50.8	-0.894006847	1289	51.52	-1.730071847
1254	50.12	2.152989938	1272	50.84	-1.067292133	1290	51.56	-1.634047456
1255	50.16	2.039266006	1273	50.88	-1.229953735	1291	51.6	-1.526504007
1256	50.2	1.910631001	1274	50.92	-1.380604168	1292	51.64	-1.408354145
1257	50.24	1.767949993	1275	50.96	-1.518035884	1293	51.68	-1.280400924
1258	50.28	1.612486037	1276	51	-1.640942645	1294	51.72	-1.143753677
1259	50.32	1.445483712	1277	51.04	-1.74838977	1295	51.76	-0.999542111
1260	50.36	1.268382172	1278	51.08	-1.839508171	1296	51.8	-0.848956671

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
1297	51.84	-0.693311482	1315	52.56	1.531832291	1333	53.28	0.406395208
1298	51.88	-0.533845947	1316	52.6	1.555647105	1334	53.32	0.285647026
1299	51.92	-0.371881328	1317	52.64	1.564177477	1335	53.36	0.16435627
1300	51.96	-0.208686932	1318	52.68	1.559436602	1336	53.4	0.043661185
1301	52	-0.045644685	1319	52.72	1.544166851	1337	53.44	-0.075576684
1302	52.04	0.115943892	1320	52.76	1.518451247	1338	53.48	-0.192443414
1303	52.08	0.274587245	1321	52.8	1.482200428	1339	53.52	-0.305797659
1304	52.12	0.429089826	1322	52.84	1.435651836	1340	53.56	-0.414799187
1305	52.16	0.57813535	1323	52.88	1.379298939	1341	53.6	-0.51857106
1306	52.2	0.72060854	1324	52.92	1.313584784	1342	53.64	-0.616115954
1307	52.24	0.855197517	1325	52.96	1.238870487	1343	53.68	-0.706669728
1308	52.28	0.980847043	1326	53	1.155825917	1344	53.72	-0.789410424
1309	52.32	1.096430247	1327	53.04	1.065257928	1345	53.76	-0.86369858
1310	52.36	1.20090228	1328	53.08	0.967930024	1346	53.8	-0.928785294
1311	52.4	1.293555732	1329	53.12	0.864418312	1347	53.84	-0.984296288
1312	52.44	1.373682285	1330	53.16	0.755586788	1348	53.88	-1.029828097
1313	52.48	1.440408284	1331	53.2	0.642411881	1349	53.92	-1.064912481
1314	52.52	1.493257998	1332	53.24	0.525677253	1350	53.96	-1.089145849

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
1351	54	-1.102133285	1370	54.76	-0.175836408	1389	55.52	0.603450331
1352	54.04	-1.104076404	1371	54.8	-0.098318404	1390	55.56	0.594734039
1353	54.08	-1.098263699	1372	54.84	-0.021862876	1391	55.6	0.583777013
1354	54.12	-1.08581186	1373	54.88	0.052912896	1392	55.64	0.570547694
1355	54.16	-1.066754323	1374	54.92	0.125142805	1393	55.68	0.555050144
1356	54.2	-1.041108911	1375	54.96	0.194217861	1394	55.72	0.537292418
1357	54.24	-1.008987103	1376	55	0.259708368	1395	55.76	0.517293414
1358	54.28	-0.970461506	1377	55.04	0.321096855	1396	55.8	0.495171972
1359	54.32	-0.925860856	1378	55.08	0.377928143	1397	55.84	0.471156097
1360	54.36	-0.875717024	1379	55.12	0.429489719	1398	55.88	0.44555892
1361	54.4	-0.820554014	1380	55.16	0.47529381	1399	55.92	0.418753394
1362	54.44	-0.760738853	1381	55.2	0.515204273	1400	55.96	0.391002894
1363	54.48	-0.696707636	1382	55.24	0.548941493	1401	56	0.362329939
1364	54.52	-0.628922673	1383	55.28	0.576076684	1402	56.04	0.332760762
1365	54.56	-0.557937929	1384	55.32	0.596189523	1403	56.08	0.30248122
1366	54.6	-0.484434685	1385	55.36	0.608944354	1404	56.12	0.27175349
1367	54.64	-0.408844354	1386	55.4	0.614190738	1405	56.16	0.240954397
1368	54.68	-0.331766788	1387	55.44	0.613476151	1406	56.2	0.210381394
1369	54.72	-0.253819988	1388	55.48	0.609739955	1407	56.24	0.1802312

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
1408	56.28	0.15080622	1427	57.04	-0.056810065	1446	57.8	-0.055742672
1409	56.32	0.122485798	1428	57.08	-0.056755848	1447	57.84	-0.055684647
1410	56.36	0.095685683	1429	57.12	-0.056701393	1448	57.88	-0.05562647
1411	56.4	0.070715357	1430	57.16	-0.056646706	1449	57.92	-0.055568147
1412	56.44	0.047625381	1431	57.2	-0.05659179	1450	57.96	-0.055509685
1413	56.48	0.026415019	1432	57.24	-0.056536643	1451	58	-0.055451083
1414	56.52	0.007188819	1433	57.28	-0.056481235	1452	58.04	-0.055392333
1415	56.56	-0.009874122	1434	57.32	-0.05642545	1453	58.08	-0.05533345
1416	56.6	-0.024612302	1435	57.36	-0.056369595	1454	58.12	-0.055274443
1417	56.64	-0.036840767	1436	57.4	-0.056313547	1455	58.16	-0.055215316
1418	56.68	-0.04634866	1437	57.44	-0.056257297	1456	58.2	-0.055156075
1419	56.72	-0.052938197	1438	57.48	-0.056200848	1457	58.24	-0.055096723
1420	56.76	-0.056464831	1439	57.52	-0.056144205	1458	58.28	-0.055037265
1421	56.8	-0.057125657	1440	57.56	-0.056087374	1459	58.32	-0.054977707
1422	56.84	-0.057077369	1441	57.6	-0.056030358	1460	58.36	-0.054918051
1423	56.88	-0.057024481	1442	57.64	-0.055973161	1461	58.4	-0.054858305
1424	56.92	-0.056971254	1443	57.68	-0.055915789	1462	58.44	-0.054798472
1425	56.96	-0.056917772	1444	57.72	-0.055858247	1463	58.48	-0.054738351
1426	57	-0.056864041	1445	57.76	-0.05580054	1464	58.52	-0.054676433

Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)	Frame	Time	Pendulum (deg)
1465	58.56	-0.054614346	1478	59.08	-0.053813243	1491	59.6	-0.053023708
1466	58.6	-0.054552331	1479	59.12	-0.053752117	1492	59.64	-0.052963422
1467	58.64	-0.054490385	1480	59.16	-0.053691056	1493	59.68	-0.052903198
1468	58.68	-0.054428509	1481	59.2	-0.053630062	1494	59.72	-0.052843037
1469	58.72	-0.054366702	1482	59.24	-0.053569135	1495	59.76	-0.052782939
1470	58.76	-0.054304923	1483	59.28	-0.053508275	1496	59.8	-0.052722904
1471	58.8	-0.054243237	1484	59.32	-0.05344748	1497	59.84	-0.052662932
1472	58.84	-0.054181635	1485	59.36	-0.053386752	1498	59.88	-0.052603022
1473	58.88	-0.054119906	1486	59.4	-0.053326087	1499	59.92	-0.052543175
1474	58.92	-0.054058421	1487	59.44	-0.053265486	1500	59.96	-0.052483393
1475	58.96	-0.053997025	1488	59.48	-0.053204946	1501	60	-0.052423674
1476	59	-0.053935696	1489	59.52	-0.05314447			
1477	59.04	-0.053874436	1490	59.56	-0.053084057			



Desain PLTGL-SB Model Tripod

DAFTAR PUSTAKA

- [1] **Alireza, Khaligh and Omer, C, O.** *Energy Harvesting : Solar, Wind, and Ocean Energy Conversion Systems.* London : CRC Press, 2010.
- [2] **Ferial.** Pengembangan Energi Arus Laut. [Online] [Cited: March 13, 2012.] <http://www.ebtke.esdm.go.id>.
- [3] Energi Gelombang. [Online] [Cited: March 07, 2012.] <http://id.wikipedia.org>.
- [4] **Arfi, B, A.** RI Temukan Pembangkit Listrik Gelombang Laut. [Online] [Cited: March 13, 2012.] <http://news.viva.co.id>.
- [5] *Analysis of Barge Models to Capture the Energy from Ocean Wave.* **Irfan, S, A and Zamrisyaf, Sy.** Surabaya : The Royal Institution of Naval Architects (RINA), 2010.
- [6] Idrul, Mohammad N. 2013. ANALISA PERBANDINGAN GERAKAN PONTON MODEL TRIPOD SIKU-SIKU DENGAN SAMA KAKI UNTUK ENERGI GELOMBANG SISTEM BANDULAN . Surabaya, ITS.
- [7] International Energy Agency - Ocean Energy System (IEA|OES) . Ref: Policy Report. Tahun 2006.
- [8] Rudianto. 2013. ANALISA GERAKAN PENDULUM DENGAN BENTUK JURING LINGKARAN PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT – SISTEM BANDULAN PADA PENGUJIAN OFFSHORE . Surabaya, ITS.

- [9] Irfan Syarif Arief, Zamrisyaf. Analysis of Barge Models to Capture The Energy from Ocean Wave. Proceeding ISCOT International Conference RINA London. 2010.
- [10] Sparisoma Viridi, dan Siti Nurul Khotimah Khusnul Khotimah, "Ayuanan Sederhana : Pengaruh PAnjang Tali, Sudut Awal, dan Massa Bandul terhadap periode serta Menentukan Konstanta Redaman"," *Prosiding Simposium Nasional Inovasi Pembelajaran dan Sainsn 2011 (SNIPS 2011)*, Juni 2011.
- [11] Lestari, Ervina. 2014. PERANCANGAN MULTISTAGE PERMANENT MAGNET GENERATOR UNTUK KEBUTUHAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA GELOMBANG LAUT SISTEM BANDUL (PLTG-SB). Surabaya, ITS.
- [12] Batik Tanjung Bumi : Unik, Eksotis dan Eksklusif. miquazura.wordpress.com
- [13] Pujanarko, Suseno, “Studi Eksperimentasi Sistem Suspensi Sederhana (Single Stick) untuk Suspensi Aktif”, Surabaya, 2005
- [14] Zeno. 2013. PERANCANGAN SISTEM TRANSMISI UNTUK PENERAPAN ENERGI LAUT. Surabaya, ITS.

BIODATA PENULIS



Penulis, Pandika Darmawan lahir di kota Semarang pada tanggal 23 Maret 1989. Penulis menghabiskan masa kecilnya di kota Medan hingga SMU. Setelah lulus dari MA Laboratorium Medan, penulis melanjutkan bangku pendidikannya di Prodi D3 Perancangan & Konstruksi Kapal di PPNS-ITS pada tahun 2008 dan lulus pada tahun 2011. Kemudian pada tahun 2012 Penulis melanjutkan ke jenjang S1 Lintas Jalur Teknik Sistem Perkapalan - Institut Teknologi Sepuluh Nopember, terdaftar sebagai mahasiswa aktif dengan NRP. 4212 105 007.

Di jurusan Teknik Sistem Perkapalan penulis mengambil bidang studi Marine Manufacturing and Design (MMD). Selain mengikuti perkuliahan, penulis juga aktif sebagai member di Laboratorium Marine Manufacturing and Design (MMD) dibawah bimbingan Irfan Syarif Arief, ST. MT, serta beberapa kegiatan kemahasiswaan lain seperti anggota dari *Student of IMarEST*, dan menjadi pemateri dan panitia maupun peserta diberbagai seminar dan pelatihan.